

41888.

T.C.
İstanbul Üniversitesi
Sosyal Bilimler Enstitüsü
İşletme Fakültesi
Sayısal Yöntemler Ana Bilim Dalı

İNSAN PERFORMANSI
GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

41888

Doktora Tezi

TEZ DANIŞMANI : Prof.Dr.Yılmaz TULUNAY
TEZİ HAZIRLAYAN : Ramiz CEPKENLİ
ENSTİTÜ NO : 586

İstanbul-1995

İlişik olarak sunduğum “İnsan Performansı Güvenilirlik Analizi” adlı tezin kendi tarafımdan ve uygun görölmeyecek herhangi bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin dipnotlarda ve kaynaklarda gösterilmiş olanlardan meydana geldiğini belirtir, bunu şerefle onaylarım.

Ramiz CEPKENLİ

ÖNSÖZ

Genel güvenilirlik analizi çalışmalarında, önceleri tüm dikkatler sadece cihaza yöneltilmiş ve insanın da sistemi oluşturan elemanlardan birisi gibi ele alınıp sistem güvenilirliğinin değerlendirilmesine gereken önem verilmemiştir. Bu eksiklik 1950li yılların sonlarına doğru farkedilmiş ve gerçekçi sistem güvenilirliği analizinin insan faktörünü de içermesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Son 20 yıl içinde insandan kaynaklanan cihaz hatalarına ve bunun sistem güvenilirliği üzerindeki etkisine ilgi oldukça artmıştır.

Gerçek yaşamda, çoğu sistemlerde sistemin otomasyon derecesi ne olursa olsun belirli miktarda insanın sistem içinde yer alması gerekmektedir. İnsanın sistem içinde yer alması halinde; eğitim, tecrübe veya ehliyet derecesi ne kadar artırılsa dahi insanın hata yapma olasılığı daima mevcut olup insan faktörünü göz önüne almaksızın yapılacak sistem güvenilirlik çalışmaları sağlıklı olamayacaktır.

Yapılan bu çalışmada bireysel olarak insan güvenilirlik fonksiyonu, insan güvenilirliği öngörümü, insanı içeren sistemlerin güvenilirliklerinin etkin şekilde modelleme ve analiz teknikleri, insan hatalarının nedenleri ve olasılıkları, bakım-idame ve kalite kontrol faaliyetlerinde insan güvenilirlikleri, bilgisayar ve insan etkileşimi konusunda inceleme ve araştırmalar yapılarak özgün modeller geliştirilmeye çalışılmıştır.

Doktora öğrenciliğim dönemimde, eğitim ve öğrenimimde önemli katkıları olan tüm öğretim üyelerine, bu çalışmada; tez konusumun seçimi, tez aşamasında yapıcı eleştirileri ve yönlendirici gayretlerinden dolayı Prof.Dr.Yılmaz TULUNAY'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ramiz CEPKENLİ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	: v
1. GİRİŞ	: 1
2. GENEL GÜVENİLİRLİK KAVRAMI	: 2
2.1.Uygulama Sahaları ve Yararları	
2.2.Güvenilirlik Optimizasyonu	
2.3.Güvenilirliğin Tanımı	
2.3.1.Güvenilirlikte Şartlı Olasılık ve Sistem Etkinliği	
2.3.2.Güven Düzeyi	
2.4. Genel Arıza Nedenleri ve Tipleri	
2.4.1.Arızalanma Nedenleri	
2.4.2.Güvenilirlik Küvet Eğrisi	
2.5.Yaşın Güvenilirlik Üzerine Etkisi	
2.6.Faaliyet Sürelerinin Etkileri	
2.7. Stresin Ekisi	
3. MATEMATİKSEL VE TEMEL GÜVENİLİRLİK KAVRAMLARI	: 17
3.1. Matematiksel ve İstatistiki Fonksiyonlar	
3.2. Güvenilirlik Dağılımları	
3.2.1. Üssel Dağılım	
3.2.2. Weibull Dağılımı	
3.2.3. Normal Dağılım	
3.2.4. Lognormal Dağılım	
3.3. Olasılık ve Güvenilirlik Dağılımlarının Saptanması	
3.4. Karışık Kitle Güvenilirlik Öngörümü	
3.5. Erken, Şans ve Eskime Güvenilirlikleri	
4. SİSTEM GÜVENİLİRLİĞİ MODELLEME VE ANALİZİ	: 44
4.1. Kombinasyonel Modelleme ve Analiz	
4.1.1. Seri Sistemlerin Güvenilirliği	
4.1.2. Paralel Sistemlerin Güvenilirliği	
4.1.3. Yedekli Sistemlerin Güvenilirliği	
4.1.4. Karmaşık Sistemlerin Güvenilirliği	
4.2. Markov Modelleme	
4.2.1. Ayrık ve Sürekli Sistemlerin Markov Modellemesi	
4.2.2. Güvenilirlik Sisteminin Markov Modellemesi	
4.2.3. Durum Uzayı Yaklaşımı	
4.3.Sistem Güvenilirliğinde BAYE'S Teoremi	
4.4.Farklı Stres Düzeylerine Maruz Sistemler	
4.5.Poisson Dağılımının Sistem Güvenilirliğine Uyarlanması	
4.6.Sistem Güvenilirliği Değerlendirme Kriterleri	
4.6.1.Doğrusal Model	
4.6.2.Olasılıksal Model	

5. İNSAN PERFORMANSI GÜVENİLİRLİĞİ	: 65
5.1. Ayrık Görevlerde İnsan Hata Olasılıkları	
5.1.1. Temel Görev Hata Olasılığı	
5.1.2. Ardışık Görev Hata Olasılığı	
5.1.3. Tekrarlı Ardışık Görevli Hata Olasılığı	
5.2. Zaman Sürekli Görevlerde İnsan Hataları	
5.3. İnsan Performansı Etkinlik Fonksiyonları	
5.3.1. Zaman Sürekli Görevlerde İnsan Güvenilirliği	
5.3.2. Düzeltilebilirlik	
6. İNSAN- STRES PERFORMANS ETKİLEŞİMİ	: 84
6.1. Mesleki Stresin Nedenleri	
6.2. İnsan Üzerindeki Stresin Özellikleri	
6.3. Stresin Birey Üzerindeki Etkileri	
6.4. Stres Kontrol Faktörleri	
7. ÇALIŞMA ORTAMI-İNSAN PERFORMANS ETKİLEŞİMİ ..	: 88
7.1. Vardiya Usulü Çalışma	
7.2. Isı ve Performans	
7.3. Titreşim ve İnsan Performansı	
8. İNSAN HATALARI	: 94
8.1. İnsan Hatalarının Ortaya Çıkışı	
8.2. Zihinsel Kontrol ve İnsan Hata Mekanizması	
8.3. İnsan Hata Faktörleri ve Sonuçları	
8.4. İnsan Hata Sahaları Tip ve Nedenleri	
8.5. İnsan Hata Olasılığı Taksonomisi	
9. İNSAN GÜVENİLİRLİK VERİLERİ	:107
9.1. Genel Güvenilirlik Verileri	
9.2. Sistem Geliştirme Aşamasında İnsan Faktörü Verileri	
9.3. İnsan Performansı Veri Sistemi	
9.4. İnsan Güvenilirlik Veri Bankaları	
9.5. Örnek İnsan Performansı Verileri	
9.6. İnsan Hata Oranı ve Güvenilirlik Verilerinin Kullanımı	
10. İNSAN GÜVENİLİRLİĞİ ANALİZ TEKNİKLERİ	:130
10.1. İnsan Hata Oranı Öngörüm Tekniği	
10.2. PONTECORVO Metodu	
10.3. Blok Diyagram Metodu	
11. İNSAN GÜVENİLİRLİĞİNİN MARKOV MODELLEMESİ ..	:139
11.1. Normal Çalışma Ortamında Operatör Güvenilirliği	
11.1.1. Normal Ortamda Zaman Sürekli Görev	
11.1.2. Normal Ortamda Kritik İnsan Hatası	
11.2. Gerilim Altında Operatör Güvenilirliği	
11.2.1. Gerilim Ortamında Giderilemeyen İnsan Hatası	

11.2.2. Gerilim Ortamında Telafi Edilebilir İnsan Hatası

12. SİSTEM GÜVENİLİRLİKLERİNİN İNSAN HATALARI İLE MODELLEMESİ	:151
12.1. İki Birimli Aktif Aktif Paralel Sistem	
12.2. Tamir Edilebilir İki Elemanlı Paralel Sistem	
12.3. Aynı Tip İki Elemanlı Yedekli Sistem	
12.4. Kritik İnsan Hatası İçeren Sistemlerin Analizi	
12.4.1. Tamir Edilemez İki Birimli Paralel Sistem	
12.4.2. Tamir Edilebilir İki Birimli Paralel Sistem	
13. ETKİN İNSAN BİLEŞİMLİ SİSTEM TASARIMI	:170
13.1. Matematiksel Modelleme	
13.2. Sistem Geliştirme Yaklaşımları ve İnsan	
14. BAKIM, İDAME FAALİYETLERİNDE İNSAN GÜVENİLİRLİĞİ	:178
14.1. Bakım ve İdame Faaliyetlerinde İnsan Güvenilirliği	
14.1.1. Bakım ve İdame Karakteristikleri	
14.1.2. Etkin Bakım ve İdame Özellikli Tasarım	
14.1.3. Bakım Prosedürleri	
14.1.4. İnsan Gücü Gereksinim Modelleri	
14.1.5. Bakım Azalma Eğrisi	
14.2. Kalite Kontrol Faaliyetlerinde İnsan Güvenilirliği	
14.2.1. Muayene ve Muayene Hataları	
14.2.2. Muayene Elemanı Ölçülendirilmesi	
14.2.3. Hataların Tesbit Edilebilirliği	
14.2.4. Karar Verme	
14.2.5. Personel Karakteri ve Eğitimi	
14.2.6. Davranışsal ve Organizasyonel Faktörler	
15.BİLGİSAYAR ORTAMINDA İNSAN PERFORMANSI GÜVENİLİRLİĞİ	:202
15.1.İnsan-Bilgisayar etkileşimi	
15.1.1.Bilgisayar Sistemi	
15.1.2. Veri Giriş Aygıtları	
15.1.3.Çıktı Tasarım Faktörleri	
15.1.4.Bilgisayara Dayalı Bilgi Sistemlerinde İnsan Hataları	
15.2.Programlama Hataları ve Yazılım Güvenilirliği	
15.2.1.Bilgisayar Programlama Faaliyetlerinde İnsan Hataları	
15.2.2.Yazılımın Kalitesi	
15.2.3.Yazılım Güvenilirliği	
15.2.3.1.Yazılım Güvenilirlik Modelleri	
15.2.3.2.Güvenilir Yazılım Teknikleri	
16.SONUÇ	:219

KAYNAKÇA

ÖZET

Sistem güvenilirlik analizlerinde önceleri tüm dikkatler donanım güvenilirliğine yönlendirilmiş, insanın da sistemi oluşturan diğer elemanlardan birisi gibi ele alınıp, sistem güvenilirliğinin değerlendirilmesine daha gerçekçi yaklaşım sağlamak amacıyla yapılan çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır.

Yapılan bu çalışmada bireysel olarak insan güvenilirlik fonksiyonu, insan güvenilirlik öngörümü ve insanı içeren sistem güvenilirliklerinin etkin şekilde modelleme ve analiz teknikleri, insan hatalarının nedenleri ve olasılıkları, bakım-idame ve kalite kontrol faaliyetlerinde insan güvenilirlikleri, insan-bilgisayar etkileşimi ve yazılım güvenilirliği konularında inceleme ve araştırmalar yapılarak özgün modeller geliştirilmeye çalışılmıştır.

- İnsan performansı güvenilirliğinin mana ve öneminin belirtildiği giriş bölümünden sonra genel güvenilirlik kavramı, uygulama sahaları ve yararları, üretici ve tüketici açısından optimum güvenilirlik seviyelerinin tesbiti konuları ile genel arıza neden ve tipleri incelenmiştir. Güvenilirlik analizlerinde önemli yeri olana *güvenilirlik kuvvet eğrisi*, yaşın, faaliyet süresinin ve stresin güvenilirlik üzerine etkileri araştırılmıştır.

- Matematiksel ve temel güvenilirlik kavramları bölümde:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

şeklinde ifade edilen genel güvenilirlik fonksiyonunun eldesi, arıza yoğunluk fonksiyonu ($f(t)$), hazard oranı (λ), arızalar arası ortalama zaman (AAOZ) gibi fonksiyonların eldeleri ve aralarındaki ilişkiler belirlenmiştir. Üssel, Weibull, Normal, Lognormal; güvenilirlik, arıza oranı ve arızalar arası ortalama zaman fonksiyonları, özellikleri, uygulama sahaları araştırılmıştır. Güvenilirlik fonksiyonlarının nasıl saptandığı, güvenilirlik kuvvet eğrisindeki; erken, şans ve eskime güvenilirliklerini nasıl dağılım gösterdiği incelenmiştir.

- Sistem güvenilirliklerinin modelleme ve analizi tekniklerinin sunulduğu bölümde, sistemlerin yapılarına ve tamir edilebilme gibi özelliklerine bağlı olarak kombinasyonel modellemede; seri, paralel, yedekli, karmaşık sistemlerin güvenilirlik modellerinin kurulması ve hesaplama teknikleri izah edilmiştir.

Ayrık ve zaman sürekli sistemlerin Markov modellemesinde ise modelin nasıl kurulacağı, durum denklemlerinin nasıl elde edileceği ve çözümleneceği, durağan durum olasılıklarının, sistem hazır bulunuşluğunun nasıl hesaplanacağı konusunda yapılan inceleme ve araştırma sonunda saptanan ve geliştirilen teknikler sunulmakta ve güvenilirlik fonksiyonunun Markov modellemesi yapılmaktadır. Ayrıca, sistem güvenilirlik hesaplamalarında BAYE'S teoremi, farklı stres düzeylerine maruz sistemlerin güvenilirlik analizi ile sistem güvenilirliğinin değerlendirme kriterlerinin neler olabileceği incelenmektedir.

- İnsan performansı güvenilirliği ile ilgili matematiksel ve istatistiksel fonksiyonların neler olabileceği ve nasıl elde edildikleri araştırılmıştır. Ayrık görevlerde, İnsan hata oranı, ardışık görev hata olasılıkları incelenmiş, zaman sürekli görevlerde insan performansı etkinlik fonksiyonu olarak:

$$R_h(t) = e^{-\int_0^t e(t) dt}$$

şeklinde ifade edilen insan performans güvenilirlik fonksiyonu ve

$$Ch(t) = \int_0^t p(t) dt$$

şeklinde ifade edilen hata düzeltilme fonksiyonlarının

matematiksel olarak eldesi, ardından; izleme, dikkat, kontrol gibi görevlerde; kaçırma, yanlış teşhis gibi hataların, hata düzeltme zamanlarının tesbiti amacıyla yapılan çalışmalar deneysel çalışmalar incelenmiş ve istatistiksel dağılımlarına ilişkin saptanan sonuçlar belirlenmiştir.

- İnsan üzerindeki stres ile performansı arasındaki ilişki incelenerek yapılan araştırmalar sonucu belirlenen mesleki stresin nedenleri, özellikleri, birey üzerindeki etkileri ve faktörleri listelenmektedir.

- Çalışma ortamının insan performansı üzerine olan etkileri araştırılmış, bu hususta yapılan çalışmalar incelenerek; vardiya, çalışma ortamının sıcaklığı, titreşim ve güdüleme gibi faktörlerin bilhassa bakım ve idame faaliyetlerinde insan performansı üzerine olan etkilerinin sayısal olarak öngörümüleri özetlenmiştir.

- İnsan hatalarının nasıl ortaya çıktığı, insan hata mekanizması, insan hata faktörleri konuları, insan hatalarının; tasarım, işletim, üretim, kontrol gibi sahalardaki tip ve nedenleri, hata faktörleri araştırılarak sınıflandırılmıştır.

• İnsan güvenilirlik verileri bölümünde, sistem güvenilirlik çalışmalarına esas teşkil edecek insan performansı güvenilirlik verilerinin kaynakları, sistem geliştirme aşamalarında ihtiyaç duyulacak insan faktörü verileri, insan performansı veri sistemi, insan veri bankası modelleri incelenmektedir. Ayrıca, çeşitli kaynaklardan temin edilen insanın; genel, kontrol elemanları ve göstergelerdeki hata oranlarına ilişkin örnek insan hata oranı tabloları verilmekte, kullanımları izah edilmektedir.

• İnsan güvenilirliğinin öngörümü ve ölçülendirilmesi amacıyla geliştirilen insan hata oranı öngörüm teknikleri (Technique for Human Error Rate Prediction (THERP)), incelenerek genel standartları, teknik içinde yer alan görev analizi olasılık ağacı metodu, hata oranı, bağımlılık, Pontecorvo metodu ve blok diagram metodu açıklanmıştır.

• İnsan güvenilirliğinin modellenmesi bölümünde, normal çalışma ortamında zaman sürekli görevi yerine getiren insanın, ardından kritik ve kritik olmayan iki tür hataya sebep olabilecek insan faaliyetinin Markov modellemesi yapılarak

-Durum denklemleri elde edilmiş,

-Laplace dönüşümü ile denklemler çözülmüş,

-Güvenilirlik fonksiyonu: $R_o(t) = e^{-\lambda t}$

-İlk insan hatasına kadar ortalama zaman fonksiyonu: $İHKÖZ = 1 / \lambda$

-İnsan arıza yoğunluk fonksiyonu: $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$

elde edilmiştir. Ayrıca gerilim ortamında insan faaliyetinin Markov modellemesi incelenerek iki farklı stres düzeyine(gerilimli, normal), telafi edilebilir ve edilemez türden hatalara sahip insanın zaman süreki faaliyetinin Markov modeli kurularak durum denklemleri ve güvenilirlik fonksiyonu elde edilmiştir.

• Sistem güvenilirliklerinin insan hataları ile modellenmesi bölümünde, çeşitli tipteki sistem faaliyetlerinin insan hatalarını ve donanım arızalarını içerecek şekilde modelleri kurulmakta, güvenilirlik ve hazır bulunuşluk analizleri yapılmaktadır

İki birimlik aktif paralel sistemin Markov modellemesi ve güvenilirlik analizi incelenmekte,

-Her bir elemanı gerek insan gerekse donanım nedeniyle arızalanabilecek tamir edilebilir iki elemanlı paralel sistemin modeli kurulup,

. Sistemle ilgili durum denklemleri elde edilmekte

. Durum denklemleri Laplace dönüşümü ile çözümlenmekte

. Durağan durum olasılıkları

. Arızaya kadar ortalama zaman, en az bir elemanın insan hatası veya donanım arızası nedeniyle devre dışı kalma olasılıkları elde edilmektedir.

-Tamir edilebilir iki elemanlı yedekli sistemin güvenilirlik analizi incelenmekte ve kritik insan hatası içeren, tamir edilebilme özelliği olmayan iki birimlik paralel sistemin faaliyetinin modeli kurulmakta, modelle ilgili diferansiyel denklemlerin eldesi ve çözümü sonucu güvenilirlik ve arızaya kadar ortalama zaman fonksiyonları elde edilmektedir.

• Etkin insan bileşenli sistem tasarımı bölümünde sistem mühendisliğince kullanılan sistem etkinliğini biçimlendiren metod olan matematiksel modelin tercih nedenleri, sistem tasarımında insan ve alet genel takas kriterleri, sistem geliştirme yaklaşımlarında gerekli insan performansı girdilerinin neler olabileceği, insan ve makina güvenilirliklerinin mukayesesi konularında derlenen özet bilgiler sunulmaktadır.

• Bakım ve idame ile kalite kontrol faaliyetlerinde insan güvenilirliği bölümünde:

- Bakım ve idame faaliyetlerinde insan faktörü, karakteristikleri, sistem hazır bulunuşluğu üzerinde insa hatasının etkileri, insan faktörünü göz önüne alarak etkin bakım ve idame öncelikli tasarımda dikkat edilmesi gereken noktalar, insan gücü gereksinin modelleri,

- Kalite kontrol faaliyetlerinde insan güvenilirliği, muayene hataları, muayene elemanının ölçülendirilmesi gibi konularda çeşitli kaynaklardan yapılan araştırma sonuçları özet bilgi halinde sunulmaktadır.

• Bilgisayar ortamında insan performansı güvenilirliğinin araştırıldığı bölümde öncelikle insan-bilgisayar etkileşimi ele alınmaktadır. Bilgisayar sistemi, veri giriş aygıtları, çıktı tasarımları açısından insan performansını etkileyici faktörler ve bilgisayara dayalı bilgi sistemlerinde insan hataları incelenmektedir.

Ayrıca, bilgisayar programla faaliyetlerinde insan hataları ve bu hataları azaltıcı teknikler, yazılımın kalitesini belirleyen faktörler, yazılım güvenilirliğini belirlemeye yarayan; Shooman, Jelinski-Moranda, Nelson v.b. modelleri ile güvenilir yazılım teknikleri açıklanmaktadır.

İNSAN PERFORMANSI GÜVENİLİRLİĞİ

1.GİRİŞ

İnsan fonksiyonları ile birbirine bağlanmış donanımı içeren sistemlerin başarılı şekilde fonksiyonlarını yerine getirmesi; cihaz ve insanın birlikte hata yapmaksızın çalışması şartına bağlı olmasına rağmen, güvenilirlik analizi çalışmalarında, önceleri tüm dikkatler sadece cihaza yöneltmiş ve insanın da sistemi oluşturan elemanlardan birisi gibi ele alınıp sistem güvenilirliğinin değerlendirilmesine gereken önem verilmemiştir.

Bu eksiklik 1950li yılların sonlarına doğru farkedilmiş ve gerçekçi sistem güvenilirliği analizinin insan faktörünü de içermesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Son 20 yıl içinde insandan kaynaklanan cihaz hatalarına ve bunun sistem güvenilirliği üzerindeki etkisine ilgi oldukça artmıştır. Elektronik cihazlarda arızaların yaklaşık %50-70'i, uçak ve füze sistemlerindeki arızalanmaların ise yaklaşık %60-70'i doğrudan veya dolaylı olarak insan hatasından kaynaklanmaktadır. Hatta, toplam başarısızlığın yaklaşık %10-15'i doğrudan insan hataları ile ilgilidir.¹ Yapılan insan hataları genel olarak hatalı davranış, bakım hatası, aletlerin yanlış yorumlanması gibi nedenlerden ileri gelmektedir.

Gerçek yaşamda, çoğu sistemlerde sistemin otomasyon derecesi ne olursa olsun belirli miktarda insanın sistem içinde yer alması gerekmektedir. Ne zaman insan işin içine karıştırılırsa; eğitim, tecrübe veya ehliyet derecesi ne olursa olsun insanın hata yapma olasılığı mevcuttur. Bu nedenle, insan faktörünü göz önüne almaksızın yapılacak sistem güvenilirlik çalışmaları sağlıklı olamayacaktır.

Günümüzde yapılan çalışmalar insan fonksiyonlarını makineler ile yer değiştirmek ve insanları bilgisayarlar ile kontrol etmeye yöneltmek olup bu çalışmaların ana amacı insana dayalı hataları azaltmaktır.

Yapılan bu çalışmada bireysel olarak insan güvenilirlik fonksiyonu, insan güvenilirliği öngörümü insanı içeren sistemlerin güvenilirliklerinin etkin şekilde modelleme ve analiz teknikleri, insan hatalarının nedenleri ve olasılıkları, bakım-idame ve kalite kontrol faaliyetlerinde insan güvenilirlikleri konusunda inceleme ve araştırmalar yapılarak özgün modeller geliştirilmeye çalışılmıştır.

¹ Meister, "The Problem of Human Initiated Failures", 8.National Symposium on Reliability and Quality Control, 1962

2.GENEL GÜVENİLİRLİK KAVRAMI

Güvenilirlik bilgisi ve uygulaması olmaksızın herhangi ülkedeki endüstrinin etkin ve verimli şekilde gelişmesi düşünülemez. Tüm ülkeler mühendislerini, sanayi ve kamu personelini bu alanda bilgilendirmek için gerekli imkanları yaratmalı ve bugünün ileri dünyasında güvenilirlik mühendisliğinin prensiplerini öğrenerek ve uygulayarak teknik ve endüstriyel ilerlemelerini sağlamalıdır.

Parçanın, bileşenin, ürünün veya sistemin verilen güvenlik düzeyinde arzu edilen süre için, belirli koşullarda bozulmadan fonksiyonlarını normal olarak yerine getirme olasılığı olan *güvenirlik*, tasarımı yapılan parçanın, bileşenin, ürünün veya sistemin sağlamlığının en iyi sayısal göstergesidir.

Güvenirlik mühendisliği, belirli çevre ve koşullarda arzu edilen güven düzeyinde; parçanın, bileşenin, ürünün ve sistemin arzu edilen zaman süresinde gerekli fonksiyonlarını arıza yapmaksızın yerine getirme olasılık ve yeterliliklerini belirlemeye, öngörmeye, dizayn, test, demo, ambalaj, nakil, depolama, çalıştırma ve performansının kontrol ve geri beslemeye ilişkin teorik ve uygulamalı yöntemleri sağlar.

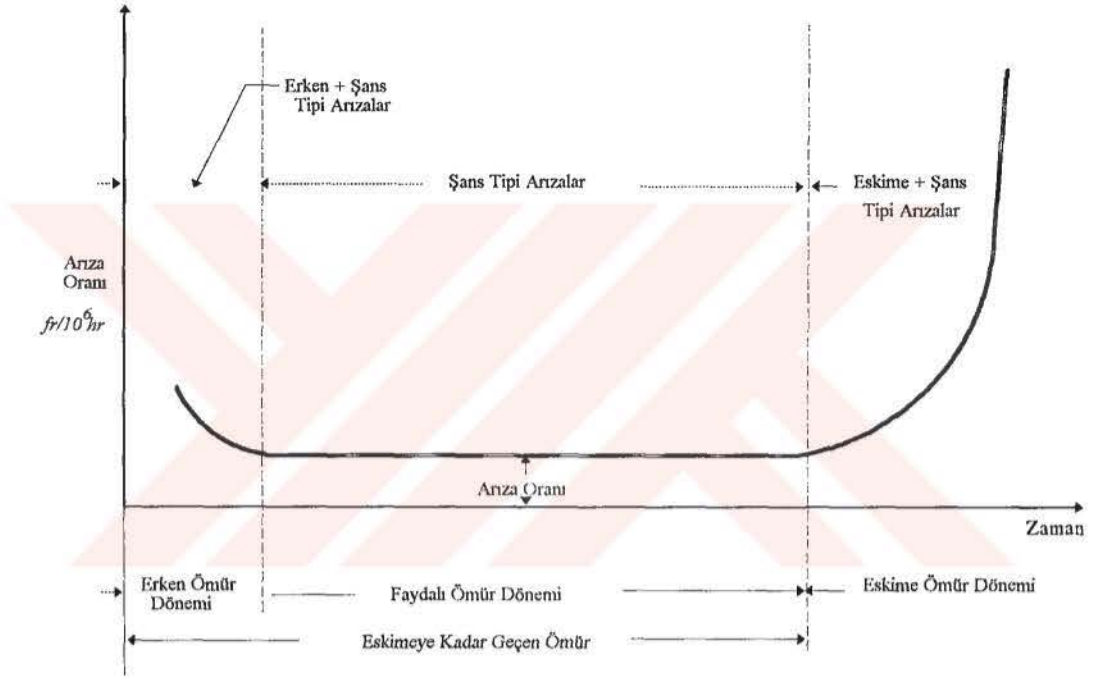
Çoğu işlerin makina, otomatik cihaz, robot ve aletlerle görüldüğü günümüzde insan oğlunun yaşamı bu alet ve cihazların güvenilirlik ve idame düzeylerine dayalı olarak başarılı çalışmalarına bağımlıdır. Güvenilirlik mühendisliğinin de, bu alet ve ürünlerin, yedek parçalarının; makul maliyette, yaşamları boyunca yüksek güvenilirlik sergileyecek şekilde dizayn, geliştirme, imalat ve sevk aşamalarındaki katkısı yadsınamaz.

2.1. UYGULAMA SAHALARI VE YARARLARI

Güvenilirlikle ilgili çalışma ve uygulama sahalari, güvenilirlik çalışmalarının sağlayacağı yararlar² aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

• Şekil 2.1 de görüldüğü gibi nesnenin toplam çalışma saatine karşılık başarısızlık oranının belirtildiği *güvenilirlik kuvvet eğrisinin* çizimiyle:

- Optimum garanti dönemi ve maliyeti
- Optimum değiştirme zamanı
- Yedek parça talebi ve üretim oranı gibi konularda öngörülerde bulunulabilir.



Şekil 2.1-Güvenilirlik Kuvvet Eğrisi

- Parça , bileşen, ürün veya sistemce denenmiş arıza tiplerinin belirlenmesi ve bu arızaları enaza indirme için dizayn, araştırma ve geliştirme olanakları
- Sistem veya cihazın yaşamında ne tip hatalarının ne zaman ortaya çıktıklarının tespiti ve giderilmeye hazır olunması
- Zaman-arıza dağılımının tespiti
- Yaş, görev süresi ve uygulama, çalışma stres düzeylerinin donanım ve insan güvenilirlikleri üzerindeki etkilerinin tespiti

² Dimitri Keçecioglu, *Reliability Engineering, Lecture Notes*, National Defense Operational Research and Analysis Establishment Lib., (Ottawa: 1990)

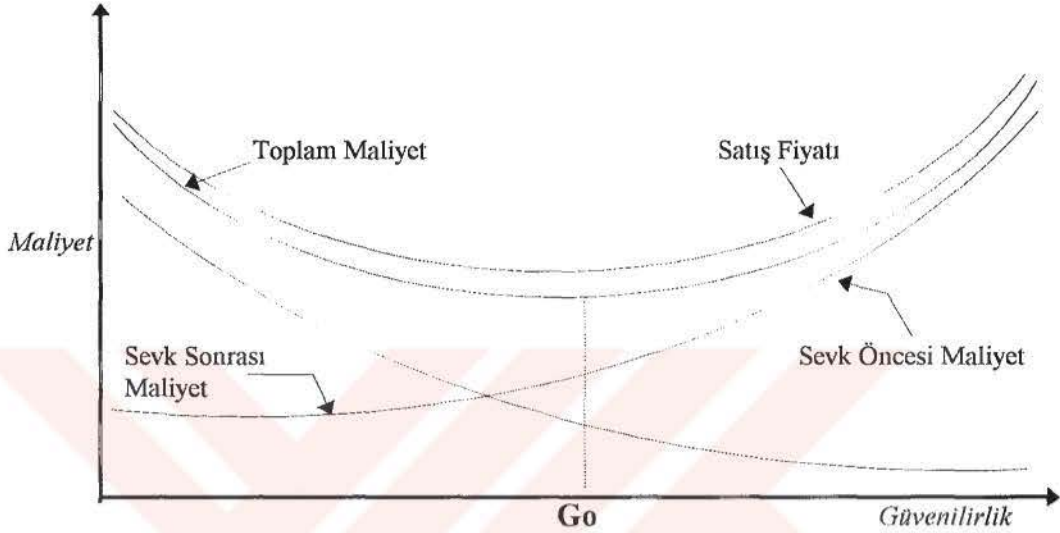
- Donanım ve insan güvenilirliklerinin öngörümü ve amaçların gerçekleştirilip gerçekleştirilmeyeceğinin tesbiti
- Güvenirlilik açısından en yararlı olacak tasarımda değişiklik yapılabilecek sahaların tesbiti
- İki veya daha fazla tasarımı mukayese ederek güvenilirlik açısından eniyi olanın seçimini sağlayacak temel ilkelerin tesbiti
- Sistem tasarımındaki mevcut aşırılıkların tesbiti
- Öngörülen güvenilirliğe ulaşabilmek için; hata modlarının, etkilerini tesbit ve analiz ederek; dizayn, araştırma ve geliştirme gayretlerin yoğunlaştırılacağı sahaların belirlenmesi
- Arıza sonuçlarının tesbiti çalışması
- Güvenirlilik öngörüm güncelleştirme metodlarının belirlenmesi
- Dizayn aşamasında parça ve bileşen, çalışma ortamı ve insan güvenilirliklerini Stres/Tepki yaklaşımı ile gözleyerek güvenilirliğin optimizasyonu
- Arıza, hata rapor sisteminin tesisi, kritik güvenilirlik dizaynları hakkında yayınların hazırlanması
- Oluşacak hatadan kimin sorumlu olacağıının belirlenmesi
- Arızaları ve insan hatalarını enaza indirgeyecek, bakım/onarım zamanlarını azaltacak, aşırı veya yetersiz dizaynı önleyecek düzeltici kararlara rehberlik edilmesi
- Değişikliklerin, ömrü arzu edilen doğrultuda ve arzu edilen düzeyde etkileyip etkilemediğinin tesbiti
- Ücretsiz ve iyi niyet indirim sahalarının tesbiti, garanti maliyetlerinin azaltılması veya garanti kapsam ve sürelerinin arttırılması
- Ürün veya sistem güvenilirliğinden başlayarak aşağıya doğru altsistem, bileşen, parça güvenilirliklerinin tesbiti
- Sistemin; minumum maliyet, işletim ve bakım giderleri için amaç güvenilirlik değerinin optimizasyonu, sistem etkinliğinin, sistem performansının belirlenmesi
- Uygun araştırma, geliştirme, dizayn, imalat, satın alma, kalite kontrol ve testler yapılırken sistem güvenilirliğine imalat başlayıncaya kadar erişilip erişilemeyeceğini görmek için sistem güvenilirliği büyüme eğrisinin hazırlanması
- Yedek parça gereksinimlerinin sağlıklı öngörümü ile giderleri azaltmak

Netice olarak; müşterinin tatmin edilmesi, satışların, karın arttırılması veya aynı kar için daha güvenilir ürün veya sistemin oluşturulmasıdır.³

³ Dimitri Keçecioglu, ibid., ss.1-19

2.2. GÜVENİLİRLİK OPTİMİZASYONU

"Tasarlanacak, üretilecek ve idame ettirilecek üründe güvenilirlik düzeyi ne olmalıdır?" sorusu ile sıkça karşılaşılır. Cevap ise "Bir ürünün sahip olunması, işletilmesi, arzu edilen yaşam süresinde bakım ve idamesini faaliyetlerini minimum kılan." şeklindedir.



Şekil 2.2-Üretici açısından optimum güvenilirlik. ⁴

Her ürün için önerilen bakım politikası ve programına bağlı olarak, imalatçı veya üretici açısından toplam maliyetin minimum olduğu belirli bir güvenilirlik düzeyi mevcut olup, bu **imalatçı** için optimum güvenilirlik düzeyidir. Bunun yanı sıra, önerilen bir bakım politika ve programına bağlı olarak kullanıcı veya tüketici açısından da ürene sahip, olmayı, işletmeyi ve bakımı minimum kılan güvenilirlik düzeyi mevcut olup her iki güvenilirlik düzeyinin aynı olması gerekmez.

Üretici açısından toplam maliyet yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi sevk öncesi ve sonrası maliyetlerin toplamıdır.

Sevk öncesi maliyet: mühendislik, araştırma, geliştirme, üretim maliyetlerinin toplamı, sevk sonrası maliyet ise nakil, kurma, başlatma, garanti ve iyiniyet maliyeti olarak adlandırılan kullanıcı hatasında dolayı bozulan fakat imalatçı tarafından değiştirme, iade, pazar ve müşteri kayıpları v.b. maliyetleri kapsar. Güvenilirlik artarken sevk öncesi maliyet de artar. Çünkü, güvenilirliği arttırmak için daha iyi veya yoğun mühendislik, araştırma, geliştirme, kaliteli parça ve bileşen, daha iyi imalat ve etkin kalite kontrolü v.b. maliyeti de arttırır.

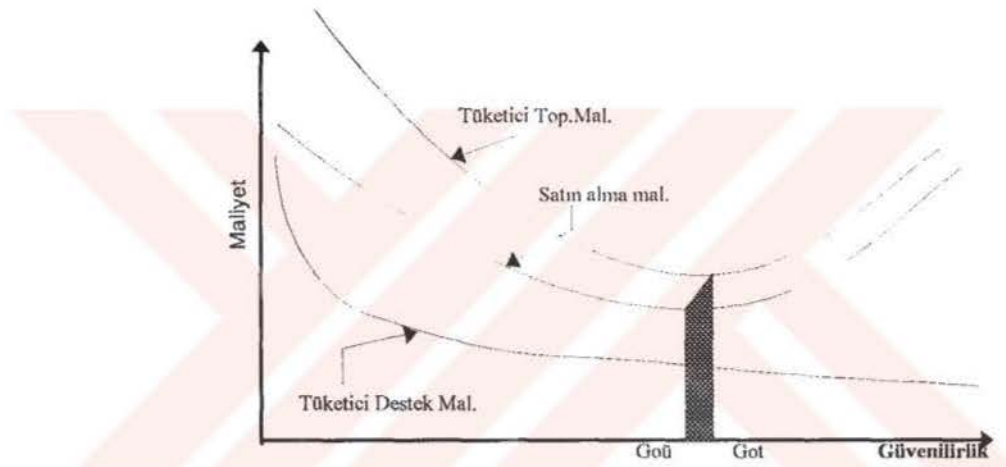
⁴ Huges & Roy, "Design of Equipment to Optimize Reliability for Manufacturer's and Costumer's Minimum Total cost", *Symposium on Advanced Marine engineering Concept for Increased Reliability*, ss. 164-224, (Michigan:1963), ss.164-224

Sevk sonrası maliyet dizayn güvenilirliği arttıkça azalır. Çünkü, daha az arıza ve bunun sonunda daha az servis, garanti ve iyiniyet masraflarını düşürecektir.

Bu iki maliyetin toplamı ve kar, satış fiyatını oluşturacaktır. Şekil 2.2’de de görüleceği gibi toplam maliyet eğrisinin minimum olduğu nokta **üretici için optimum güvenilirlik düzeyidir**. Bu düzeyin altında veya üstündeki güvenilirlik üretici açısından daha yüksek maliyet ile sonuçlanır.

Tüketici açısından toplam maliyet ilk satın alma fiyatının üzerine ürünün yaşamı boyunca, idame, yedek parça, tamir, atıl kalma, çalışma ve destek giderlerinin toplamı ile bulunur. Bu giderler, dizayn güvenilirliği arttıkça azalır.

Şekil 2.3’de görüldüğü gibi **tüketici açısından optimum güvenilirlik düzeyine** karşı gelen minimum maliyet noktasından düşük veya yüksek güvenilirlik düzeyleri yüksek maliyet ile sonuçlanır.



Goü: Üretici açısından minimum satış fiyatı için optimum güvenilirlik
Got : Müşteri açısından minimum maliyet için optimum güvenilirlik

Şekil 2.3-Tüketici açısından optimum güvenilirlik.

Şekillerde ortaya çıkan değerler belirli bakım-idame usul ve programlarının uygulanması ile elde edilen değerlerdir. Optimum güvenilirlik, bakım-idame usul ve programlarını eldesi: *Doğumundan ölümüne kadar ürünle ilgilenen tüm disiplinlerin güvenilirliğe ilişkin gayretlerini koordine eden entegre edilmiş güvenilirlik programlarının uygulanması ile gerçekleşir.*

Entegre edilmiş güvenilirlik programının amacı, tüketici açısından toplam maliyeti azaltırken, optimum güvenilirlik ve idame edilebilirlik oranlarını yükseltmektir. Bu işlem için, şirketteki mühendislik, araştırma geliştirme, imalat, maliyet analizi, kalite kontrolü, izleme, test, ambalaj, test, alım/satım departmanlarındaki güvenilirliğe ilişkin faaliyetlerinin yönetimce desteklenmesi, uzun vadeli planlama, mevcut ürünlerin yeni ve daha iyi modellerinin dizaynına esas teşkil edecek istatitiki verilerin biriktirilmesi gerekir.

Güvenilirlik analiz çalışmaların aşağıda belirtilen sahalardaki çalışmalar ile entegre edilmiş olarak yürütülmesi sonucu; daha basit, daha gelişmiş, daha güvenilir, bakım ve idame edilebilme özelliği yüksek, maliyeti daha düşük maliyetli ürünlerin eldesini mümkün kılar.

- Bileşenlerin azaltılması sonucu daha basit tasarım
- Bir sistemdeki bileşenlerin gerek güvenilirlik, gerek sistem fonksiyonu ve diğer etkinliklerin elde açısından daha iyi düzenlenmesi
- Ürünün imalatı için gerekli materyallerin daha iyi seçilmesi sonucu ürünün kalitesinde artış
- Bileşenler dizayn edilirken; stres, yorgunluk, stres-zaman ilişkisinin daha uygun seçimi sonucu faydalı ömür döneminin artırılması
- Uygun olasılıksal ve istatistiksel metodların seçimi ile optimum dizayn, stres ve mukavemet dağılımlarının tesbiti için
- Dizayn hatalarının tesbiti için dizayn, imalat, güvenilirlik ve idame kontrol listelerin uygulanması, optimal güvenilirlik ve idameyi sağlayacak tasarım geliştirmelerini başlatmaktır.
- Güvenilirlikten fedakarlık etmeksizin, tasarımların minimum maliyetteki donanıma dönüştürülmesinde uygun mühendisliğin kullanımı
- Güvenilirliğin daha önce bahsedilen uygulanabileceği sahaların ve sağlayacağı yararların değerlendirilmesi sonucu güvenilirlik analizi, öngörüm v.s. faaliyetlerin uygun sahalara kanalize edilmesi.

2.3.GÜVENİLİRLİĞİN TANIMI

Altı önemli noktayı içeren güvenilirlik tanımı: "*Cihazın veya sistemin fonksiyonlarını belirlenen performans limitleri dahilinde, belirli yaşta, belirli sürede veya görev zamanında, stres düzeyi ile ilgili belirli uygulama ve çalışma şartları altında çalışırken uygun veya hata yapmaksızın belirli bir güven düzeyinde çalışmasının şartlı olasılığıdır.*" şeklinde yapılabilir.

2.3.1. GÜVENİLİRLİKTE ŞARTLI OLASILIK VE SİSTEM ETKİNLİĞİ

Güvenilirlik, ortaya çıkan elverişli hal adedinin toplam hallere oranı olarak tanımlanabilir. Bu durumda elverişli halden kasıt, görevin başarılı olarak yerine getirilmesidir. Netice olarak, bu oranda pay; her biri t süreli başarılı ile sonuçlanan görev adedini: $N_s(t)$, payda ise herbiri t süreli üstlenilen toplam görev adedini: $N_T(t)$ ⁵ ifade eder.

$$\text{Güvenilirlik (Ortalama veya Nokta Tahmini) } R(t) = \frac{N_s(t)}{N_T(t)}$$

$N_f(t)$, başarısızlık ile sonuçlanan hal adedi olarak kabul edildiğinde güvenilirlik:

$$R(t) = 1 - \frac{N_f(t)}{N_T(t)} = 1 - Q(t) \text{ şeklinde formüle edilebilir.}$$

$Q(t)$, güvenilirlik veya başaramama olasılığının ortalama veya nokta tahminidir.

Eğer tüm görevler başarısızlıkla sonuçlanırsa: $N_T(t) = 0$ ve $R(t) = 0$,

Eğer tüm görevler başarı ile sonuçlanırsa: $N_s(t) = N_T(t)$ ve $R(t) =$

olacağından güvenilirlik 0 ile 1 arasında değişen değere sahip olacaktır.

$R(t)$, üstlenilen görev miktarının sonlu olması nedeniyle bir tahmini bir değeri ifade etmektedir. Tahmini değer; tek birim veya aynı birimden birden fazlasının yaptığı işin sonsuza ulaşması halinde gerçek güvenilirliğe yaklaşır. Diğer bir deyişle :

$$\lim_{N_T \rightarrow \infty} R(t) = \text{Gerçek Güvenilirlik}$$

Tüm cihazların işlemeye başlamadan önce faal olduğu düşünüldüğünde güvenilirliğin görevin başındaki değeri 1 dir.

$$N_s(T=0) = N_T(t) \text{ ve } R(t) = \frac{N_s(T)}{N_T(t)} =$$

Her cihazın, görevin başlangıcında mevcut olduğu ve komut verilir verilmez çalışmaya başlayacağı varsayıldığından bu durum şartlı güvenilirlik kavramı ile ifade edilmektedir. Güvenilirlik kavramının sistem etkinliğindeki rolünü aşağıdaki formülle ifade etmek mümkündür.

$$SE = O_R \cdot R_M \cdot D_A = \frac{N_{AC}}{N_T}$$

⁵ İgor Bazovsky, *Reliability Theory and Practice*, Englewood, (Cliffs:Prentice Hall Inc., 1961), ss.290-299

- O_R**: Sistemin, görevin başlangıcında hazır bulunma veya görevin başlamasına kadar önceden tanımlanmış zaman periodunda çalışmaya hazır duruma gelme, çalışmaya hazır bulunma, olasılığıdır.
- R_M**: Görevin aksaksız başlamasından sonra sistemin başarı ile tamamlama olasılığı olup güvenilirliği ifade eder.
- D_A**: Sistemin görevini başarılı olarak yerine getirdikten sonra arzu edilen sonuçların alınma olasılığı, dizayn yeterliliği, özelliğini ifade eder.

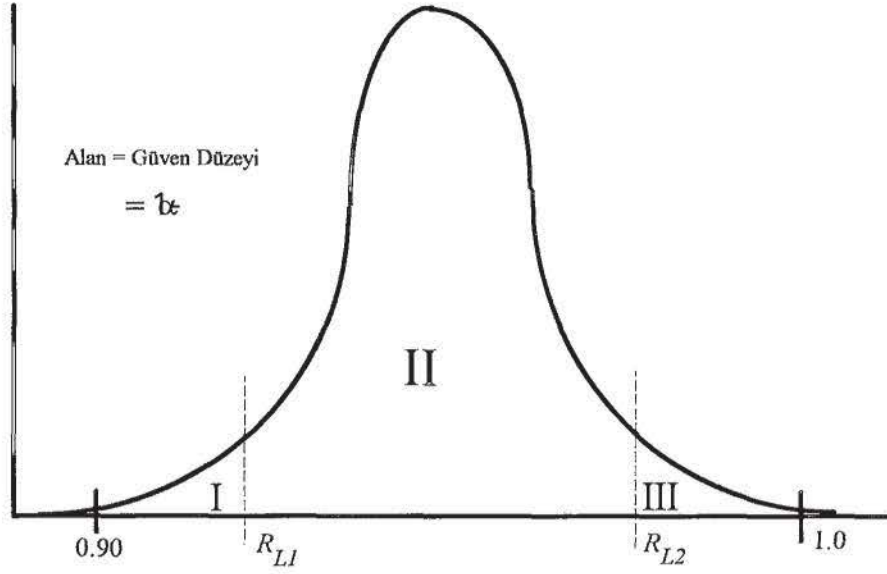
Güvenilirlik kavramından bahsederken hazır bulunma ve dizayn olasılıklarının herbirinin %100 olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle eğer güvenilirlik tek başına sistem etkinliğinin ölçüsü olarak kullanılacak ise, hazır bulunma ve yeterlilik değerlerini %100 kabul edildiğinden güvenilirlik şartlı bir olasılık olacaktır.

2.3.2. GÜVEN DÜZEYİ:

Güven düzeyi; verilen bir parametrenin iki sınır arasında olma veya alt sınırın üzerinde olma veya üst sınırın altında olma olasılığıdır. Diğer bir tanım ise parametrenin gerçek ve tahmini değerlerinin karşılıklı olarak uyumları ile ilgili olasılık olabilir.

Genellikle istatistiki tahminler gerçek değerlerin arasında uzandığı aralıklar ve olasılıkları ile ifade edilirler. Aralıkların bitiş noktaları güven sınırlarıdır. Bu sınır değerler, eğer parametrenin dağılımı biliniyorsa hesaplanabilir, fakat güvenilirlik analizinde seçilen güven düzeyleri, aralıklar, sınır değerler için güvenilirliğin ne olacağıdır

Üç adet olası hal olup bu durum mümkün hal olup bu durum Şekil 2.4'de genel olarak özetlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.4-Güvenilirlik ve güven düzeyi

II+III. Bölge güven düzeyi: Gerçek güvenilirliğin, tek yanlı, düşük, güven düzeyi sınır değerinden büyük olma olasılığıdır.

$$\text{Güven Düzeyi} = P(R \geq R_{L1}) = 1 - \alpha.$$

α : I. bölgenin alanı

I+II. Bölge güven düzeyi: Gerçek güvenilirliğin, tek yanlı, yüksek, güven düzeyi sınır değerinden küçük veya eşit olma olasılığıdır.

$$\text{Güven Düzeyi} = P(R \leq R_{L2}) = 1 - \alpha.$$

α : III. bölgenin alanı

II. Bölgede güven düzeyi: Gerçek güvenilirliğin çift yanlı, alt ve üst güven düzeyi aralığında olma olasılığıdır.

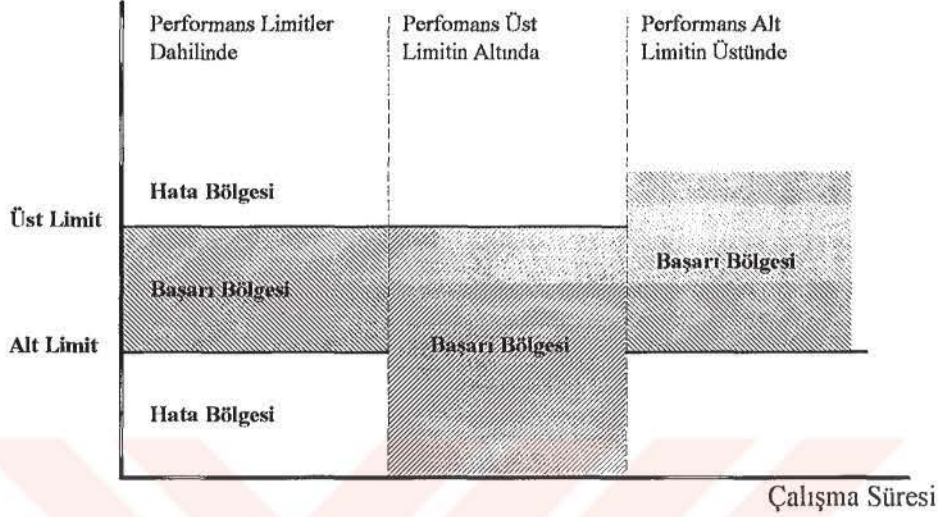
$$\text{Güven Düzeyi} = P(R_{L1} \leq R \leq R_{L2}) = 1 - \alpha.$$

α : I + III. bölgenin alanı

Görüldüğü gibi tasarımı yapılan ürün için hedef güvenilirlik değerler yeterli olmayıp aynı zamanda belirlenen güvenilirlik değeri ile ilgili olarak risklerin değerlendirilmesi açısından güven düzey veya aralıklarının saptanması de önemlidir. Genelde tercih edilen %90, 95 ve 99 olasılıklı düşük, tek yanlı güven sınıridir

2.3.3. HATASIZLIK PEFORMANSI

Ürünün, sistemin çıktılarının arzu edilen limitlerin dahilinde veya üst limitin altında veya alt limitin üstünde olması hallerine göre değişir. Aşağıdaki grafikte bu durum özetlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 2-5. Hatasız performans halleri

2.4. GENEL ARIZA NEDENLERİ VE TİPLERİ

Güvenilirlikte arızalar iki yönlü; birincisi arızaların belirli nedenlerinin listelenmesi, diğeri ise güvenilirlik kuvvet eğrisinin değerlendirilmesi ile şeklinde yapılır.

2.4.1. ARIZALANMA NEDENLERİ

1. Erken Arıza : Erken arıza, bir ünitenin çalışma ömrünün başlarında ortaya çıkar ve yaş artarken azalan arıza oranı ile karakterize edilir.

- Yetersiz imalat teknikleri
- Yetersiz kalite kontrolü
- Taşıma ve depolama hataları
- Hatalı montaj
- İlk enerjinin ani yüklenmesi
- Çevreden bulaşma ve kirlilik
- İnsan Hataları
- Hatalı çalıştırma
- Kötü işçilik
- Yetersiz hata arama
- Düşük standartta hammadde
- Düşük standartta parça
- Arızalanan bileşenlerin daha önce denenmemiş bileşenle ile değiştirilmesi

2.Şans Arızaları: Şans eseri arızalar, rastgele, düzensiz aralıklarla, beklenmeyen zamanlarda vuku bulmalarına rağmen, zaman-arıza dağılımları negatif üssel dağılım olup, arıza oranları da pratik olarak sabit kabul edilir.⁶

- Çalışma esnasında uygulanan ortaya çıkan stres ile dizayn ve imalatta tasarlanan stresin uyumsuzluğu
- Yetersiz dizayn güvenlik faktörleri
- Beklenen rastgele yükten daha fazlasının ortaya çıkması
- Beklenen rastgele mukavemetten daha düşüğün ortaya çıkması
- En iyi gözlem tekniklerinin uygulanmasına rağmen gözden kaçan kusurlar
- Kullanımdaki insan hataları**
- Yanlış uygulama
- Suistimal
- En iyi arıza takip ve bakım tekniklerinin bertaraf edemediği arızalar
- İzah edilemeyen arızalar
- Kader, taksirat (fırtına, deprem, yıldırım, sel v.b.)

3.Eskime Arızaları: Çalışma ömrünün son zamanlarında da ortaya çıkarlar ve yaş ile artan arıza oranı ile karakterize edilirler.

- Yaşlanma
- Eskime
- Dayanıklılık değerinde azalma
- Yorgunluk
- Sürtünme, aşınma
- Paslanma
- Mekanik, elektrik, kimyasal veya hidrolik bozulmalar
- Kötü servis, bakım, tamir, değiştirme
- İmalat esnasında belirlenmiş kısa ömür

Eğer erken arıza nedenleri elimine edilemez, en aza indirgenmez ise maliyeti yüksek ve telafisi çok güç zor arızalara neden olmaları açısından önemlidir.

Şans tipi arıza nedenleri tasarım arıza oranının arzu edilen güvenilirlik taleplerini karşılayan değerlerden küçük veya eşit olup olmadığını yakinen takip etmek açısından önemlidirler.

Erken, şans ve eskime arıza sebeplerinin herhangi bir kombinasyonu belirli çalışma ortamında belirli elemanlar üzerinde etkin olabilir. O elamanını arıza yapmasına neden olan tüm sebepler elimine edilemediği zaman, hiç olmazsa en aza indirgemenin yolları araştırılmalıdır.

⁶ Dimitri.Keçecioglu, op.cit., s.3-20

Yukarıda tip ve nedenleri sıralanan arızalar, sistemde aniden, beklenmedik zamanda ortaya çıkabilir ve sistem çıktısı sifıra veya arzu edilen performans limitlerinin dışına taşabilir.

Bazı tip arızalar sistem performansını azaltıcı yönde olup çıktı gittikçe kayar ve ya üst limitin üstüne veya alt limitin altına geçer. Eğer sistem kapatılır ve belirli bir süre sonra tekrar açılır ise, çıktının düzeyi kapatılmadan önceki düzeye gelir ve tekrar kaymaya devam eder. Sistem çıktısının normale döndürülme olanağı olmayıp; yorulma, korozyon, eskimeden doğan arızalar bu tip arızalardır.

Sistem performansını saptırıcı arızalar, düşürücü arızalara benzerler, yalnız sistemin kapatılıp tekrar açılması halinde sistem arzu edilen performans limitlerine gelir ve başarılı şekilde fonksiyonunu sürdürür. Bileşenlerin parametreleri arzu edilen limitlerin veya kalibrasyon değerlerinin dışına çıktığı zaman oluşur.

Gelip giden arıza halinde, bilinmeyen zaman ve nedenlerden dolayı çıktı sifıra gider, ünite kapatılıp açılmamasına rağmen aniden arzu edilen performans limitlerine gelir. Kalitesiz montaj, rutubet, dinamik çalışma ortamı v.b. nedenler bu tip arızaların nedeni olup, arızalar kolayca gözlemlenirken yerinin tesbit ve izolasyonu zordur.

2.4.2.GÜVENİLİRLİK KÜVET EĞRİSİ

Güvenilirlik küvet eğrisi bir cihazın yaşamında **erken, faydalı ve eskime** olarak adlandırılan üç dönemde güvenilirlik dağılımını göstermektedir.

Arıza oranının sabit ve minimum olduğu dönem *faydalı yaşam* dönemi olarak adlandırılır. Bu dönemde en yüksek güvenilirlik ve en düşük arıza oranı beklendiğinden ortaya çıkan arıza miktarı en düşük düzeydedir.

Erken yaşam döneminde genellikle erken ve şans arızaları vuku bulurken *eskime yaşam* döneminde şans ve eskime arıza tipleri vuku bulur. Hatta erken yaşam döneminde zayıf ambalaj, nakliye ve uygun olmayan taşıma v.b. nedenlerden dolayı eskime türü arızaların, eskime yaşam döneminde erken tip arızaların ortaya çıkması mümkün olduğu için güvenilirlik küvet eğrisi de ideal değildir. Fakat tamamen olmasa da çoğu parça, bileşen, alt sistem, ürün ve sistem küvet tip yaşam eğrisine sahiptirler. Benzer şekilde **insanoğlu** da arıza oranının, örneğin 100.000 kişi arasında ölen kişi miktarı olarak göz önüne alındığında , bir nevi küvet tip eğri sergiler.

Bu gerçeklerin ışığı altında oluşan arızaların tesbiti, hızlı ve başarılı önlemlerin alınması mümkündür. Tüm imalata yönelik firmalarda olması arzu edilen arıza analiz laboratuvarlarında; tip ve sebeplerinin, arıza yaşının belirlenmesi düzeltici önlemlerin daha ucuz ve etkin şekilde alınmasının sağlar.

2.5.YAŞIN GÜVENİLİRLİK ÜZERİNE ETKİSİ

Güvenilirlik büyük oranda yaş ile bağlantılıdır. Matematiksel olarak bu durum aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$R(T+t) = \frac{R(T+t)}{R(T)}$$

Bu formüle göre T yaşında başlayan t süreli görevde güvenilirlik değeri: (T+t) dönemini kapsayan güvenilirlik değerinin, sıfır yaşında başlayan, T yaşına karşı gelen güvenilirliğe bölünmesi ile elde edildiği ifade edilmektedir.

Arıza oranının sabit veya faydalı yaşam döneminde ;

$$R(T,t) = \frac{e^{-\lambda_u(T+t)}}{e^{-\lambda_u T}} \text{ denkleminde } R(T,t) = e^{-\lambda_u t} = R(t) \text{ elde edilir.}$$

Yukarıdaki eşitliğe göre faydalı yaşam döneminde güvenilirlik yaşa bağlı fakat sadece görev süresinin bir fonksiyonudur. Erken yaşam döneminde Weibull dağılımı ön plana çıkmakta⁷ ve

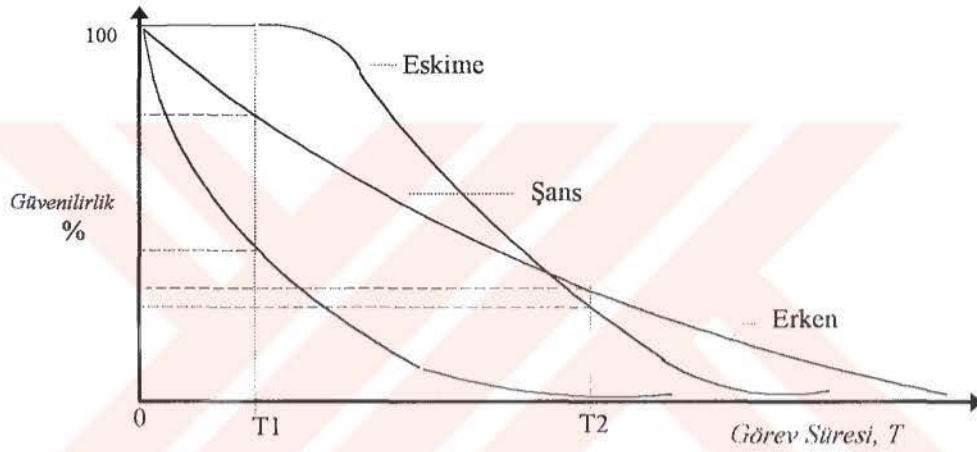
$$0 < \beta < 1 \text{ iken güvenilirlik: } R(T,t) = e^{[-(T+t-\gamma)/\eta]^\beta} / e^{[-(T-\gamma)/\eta]^\beta}$$

Bu formülden görülmektedir ki erken yaşam güvenilirliği; görev süresinin olduğu kadar yaşın da bir fonksiyonudur. Benzer şekilde eskime yaşam süresince de Weibull dağılımı ($\beta > 1$) kullanılmaktadır. Sonuç olarak bir birimin belirli görev süresi için güvenilirliğini hesaplayabilmek, görevin başındaki ve sonundaki yaş bilinmelidir. Eğer görevin başlangıç ve sonundaki yaşlar tesadüfen faydalı yaşam döneminde ise sadece görev süresinin bilinmesi yeterlidir.

⁷ Dimitri Keççecioğlu, *Reliability Engineering*, op.cit., s.3-38

2.6. FAALİYET SÜRESİNİN ETKİLERİ

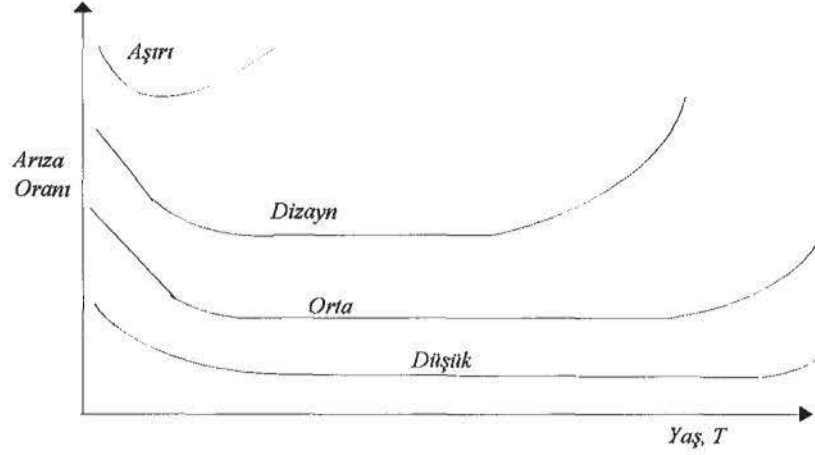
Güvenilirlikten bahsedilirken, güvenilirğin uygulanacağı zaman süresi de belirtilir. Bu süre görev süresi olup, güvenilirliğin yüksek olması arzu edildiğinde görev süresinin mümkün olduğu kadar kısa tutulması gerekir. Bu dönemden sonra birimin, müteakip görev başlamadan önce, durumu kontrol edilir. Eğer birim uzun süre kesintisiz, arıza oranı azalacak şekilde çalışacak ise, faydalı zamanın kullanımı, sistemde paralel veya yedek birimlerin kullanılması, güvenilirliğin artırılması açısından daha iyi yoldur. Görev süresinin güvenilirlik üzerine etkisi, aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi görev süresi artarken güvenilirlik azalmakta veya tersi olmaktadır.



Şekil 2.6. Görev süresinin güvenilirlik üzerine etkisi

2.7. STRESİN ETKİSİ

Stresin güvenilirlik üzerindeki etkisini göstermenin en iyi yolu, dört farklı stres düzeyinin ve arıza oranı üzerindeki etkisinin görüldüğü aşağıdaki şekli incelemektir. Stres düzeyleri; düşük, orta, imalat(oransal) ve çok yüksek olarak sınıflandırılabilir. Yüksek stres düzeyinde erken yaşam arıza oranı daha yüksek, faydalı yaşam dönemi daha kısa olup, eskime dönemi ise oldukça erken başlar. Eskime arıza oranı artışı çok yüksek olup, faydalı yaşam dönemi hemen hemen yok gibidir.



Şekil 3.4-Stres düzeyinin güvenilirlik üzerine etkisi

Matematiksel olarak, faydalı dönemde stresin güvenilirlik üzerindeki etkisi; uygulama stres faktörü, K_{uy} , çalışma stres faktörü, $K_{i\check{s}}$ değerlerinin kullanımı ile açıklanabilir. Uygulama stresi; bileşen veya altsistemin güç giriş çıkış ilişkileri veya dahili yükler sonunda ortaya çıkar. Çalışma stresi, titreme, hızlanma, şok, irtifa, rutubet v.b. oluşan çevrenin bileşen veya cihaz üzerindeki etkisi ve harici yükler sonunda ortaya çıkar.

Faydalı yaşam dönemi içinde gerçek arıza oranını hesaplamannın bir diğer yolu da:

$$\lambda_{Gerçek} = \lambda_{Jenerik} \cdot K_{uy} \cdot K_{i\check{s}}$$

Günümüzde, faydalı yaşam süreleri dışındaki yaşam dönemlerine ait gerek uygulama, gerece çalışma faktörleri için yeterince eğri ve tablolar geliştirilmiş değildir.

Görüldüğü gibi uygulama ve çalışma stres faktörlerinin güvenilirlik üzerine etki tartışılmaz. Sağlıkla güvenilirlik analizinde bu etki; arıza oranı, arızaya kadar ortalama zaman gibi kriterlere yansıtılması, doğru ve uygulanabilir bileşen, alt-sistem, sistem, ürün güvenilirliklerinin eldesi için gereklidir.

3. MATEMATİKSEL ve TEMEL GÜVENİLİRLİK KAVRAMLARI

3.1.MATEMATİKSEL VE İSTATİSTİKİ FONKSİYONLAR

Güvenilirliğin genel formülünün eldesi için olasılığın temel tanımını kullanırsak; teste tabi tutulan elemanların, n_0 , t zaman sonra $n_f(t)$ adedinin arızalanmasına karşılık, $n_s(t)$ adedinin arızalanmaması halinde güvenilirlik¹

$$R(T) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)}$$

şeklinde ifade edilebilir. $n_s(t) + n_f(t) = n_0$ olarak kabul edilirse yukarıdaki eşitlik,

$$R(t) = n_s(t)/n_0$$

haline dönüşür. Eğer t zaman aralığında arızalanma olasılığı $F(t)$ ise,

$$F(t) = \frac{n_f(t)}{n_0} = \frac{(1 - n_s(t))}{n_0} \quad \text{şeklinde ifade edilebilir.}$$

$$R(t) + F(t) = \quad \text{olup,}$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \frac{n_f(t)}{n_0} \quad \text{ifadesinin, zamana göre türevi alınırsa:}$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{n_0} \frac{dn_f(t)}{dt} \quad \text{elde edilir.}$$

Arızanın oluşma frekansını belirten $dn_f(t)/dt$, ifadesinin zamana karşılık olarak grafiği çizilir ise orjinal n_0 elemanın arızalananlarının zaman dağılımı elde edilir.²

Eğer $\frac{1}{n_0} \frac{dn_f(t)}{dt}$ grafik olarak çizilir ise tek elemanın arıza dağılımı veya her

elemanın arıza frekans eğrisi elde edilir. Fonksiyon, $dn_f(t)/dt$ ile aynı karakterlere sahip olup sadece ordinatı n_0 'e bölünmektedir. Böylece, dt değeri sıfıra giderken yukarıdaki ifadenin limiti **arıza yoğunluk fonksiyonunu** verir.

¹ Balbir .S.Dhillon ve Chanan Singh, *Engineering Reliability, New Techniques and Applications*, (New York: Jhon Waley & Sons, 1981), ss. 25-28

² İgor Bazovski, op.cit., ss.28-29

$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{1}{n_0} \frac{dn_f(t)}{dt} \rightarrow f(t)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t) \text{ ve } \frac{dn_f(t)}{dt} = -n_0 \frac{dR(t)}{dt} \text{ elde edilir.}$$

$dn_f(t)/dt$, t ve $(t + dt)$ zamanları arasındaki dt zaman aralığında arızalanan bileşen adedi olarak yorumlanabileceği gibi, t anında test altında $n_s(t)$ adet eleman olduğu ve bunun $dn_f(t)/dt$ adedinin arızalanacağı şeklinde yorumlanabilir.

Yukarıdaki eşitliğin her iki tarafını $n_s(t)$ 'ye bölersek **ani arıza veya hazard oranı** elde edilir.

$$\frac{1}{n_s(t)} \cdot \frac{dn_f(t)}{dt} = -\frac{n_0}{n_s(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

GÜVENİLİRLİKLE İLGİLİ FONKSİYONLAR VE ARALARINDAKİ İLİŞKİLER:

•**Güvenilirlik:** Bir sistem veya elemanın herhangi bir t anındaki güvenilirliği olasılıksal olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.³

$$R(t) = P(X \geq t)$$

X : Sistemin veya elemanın ömrü

t : Zaman

P : Olasılık

R : t anındaki güvenilirlik.

Bu eşitlik bir elemanın $(0, t)$ aralığında bozulmama olasılığının güvenilirliğe eşit olduğunu belirtir.

•**Arıza yoğunluk fonksiyonu ve Güvenilirlik:** Sistemin arızalanmasına kadar geçen süreyi **X sürekli** rastgele değişkeni olarak tanımlarsak, X 'in olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(t)$, $0 < t < \infty$ sistemin arıza yoğunluk fonksiyonu olarak da bilinir. Bu nedenle sistemin $t, t+dt$ zaman aralığında arızalanma olasılığı $f(t)$ arıza yoğunluk fonksiyonu ile tayin edilir.

³ Balbir S.Dhillon, op.cit., s. 12

$$R(t) = P(x > t) = \int_t^{\infty} f(x)dx, \quad x=0 \text{ anında çalışmaya başlayan sistemin } t \text{ anına kadar}$$

çalışacağını ifade eden **güvenilirlik fonksiyonunu** verir.

• **Ömür dağılımı ve güvenilirlik:**⁴ x 'in kümülatif olasılık fonksiyonuna F dersek,

$$F(T) = P(x \leq t)$$

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(x)dx \quad \text{Her iki tarafın türevi alınır ise}$$

$$\frac{dF(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^t f(x)dx \quad \text{ve} \quad f(x) = \frac{dF(x)}{dt} \quad \text{elde edilir.}$$

x , rastgele değişkeninin süreksiz olması durumlarında kümülatif olasılık fonksiyonu, x rastgele değişkeninin sürekli olması halinde arıza olasılık dağılım fonksiyonu olan $F(t)$, $0 \leq t \leq \infty$, sistemin **ömür dağılımı** olarak bilinmekte olup, $x=0$ anında çalışmaya başlayan sistemin $x = t$ anında veya önce arızalanma olasılığıdır. Tersini düşünülerek güvenilirlik :

$$R(t) = 1 - P(x \leq t) = 1 - F(t)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad \text{veya} \quad R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad \text{şeklinde ifade edilebilir}$$

• **Hazard Fonksiyonu:**⁵ Belirli bir süreye kadar çalışmış bir sistemin o andaki arızalanma olasılığına **hazard oranı**, **arıza oranı** veya **hata yoğunluğu** denir. Zamanın fonksiyonu olarak arıza oranının davranışı, sistemin hazard fonksiyonu, hayat karakteristiği veya lambda karakteristiği olarak bilinir. Bir sistemin hazard fonksiyonu veya oranı $H(t)$, $(t, t+dt)$ zaman aralığında arızalanma olasılığı,

$$F(t) = P(T \leq t) \text{ ise,}$$

$$Prob(t < T \leq t+dt) = F(t+dt) - F(t) \quad (1)$$

Hazard fonksiyonu, t ye kadar arızalanmama olasılığı, $R(t)$, ve t ye kadar arızalanmama kaydıyla, $t < T \leq t+dt$ aralığında arızalanmasının şartlı olasılığı ile ifade edilmek istendiğinde:

⁴ Ramiz Cepkenli, "Genel Güvenilirlik Kuramı", (Doktora Seminer Ödevi, İ.Ü. İşletme Fakültesi, 1981)

⁵ Kyung S.Park, H.Reliability, (Amsterdam: Elsevier Science Publishing Inc., 1987), ss.151-152

$$Prob(t < T \leq t+dt) = R(t) Prob(t < T \leq t+dt \mid T > t) \quad (2)$$

(1) ve (2) den

$$Prob(t < T \leq t+dt \mid T > t) = \frac{[F(t+dt) - F(t)]}{R(t)} = \frac{dF(t)}{R(t)}$$

$$Prob(t < T \leq t+dt \mid T > t) = [F(t+dt) - F(t)] / R(t) = dF(t)/R(t) \text{ elde edilir.}$$

Her iki tarafın dt 'ye bölünmesi ve dt sıfıra giderken limitinin alınmasıyla hazard fonksiyonu elde edilir.

$$\frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{dF(t)}{R(t)} \text{ ve } \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \text{ elde edilir.}$$

Hazard oranı biliniyor ise, hayat dağılımı, yoğunluk fonksiyonu ve güvenilirlik fonksiyonlarının eldesi mümkündür. Eğer $R(t)$ ile $f(t)$ ve $h(t)$ arasındaki ilişki ifade edilmek istendiğinde : Mantıksal olarak $F(\infty) = 1$ ve $R(\infty) = 0$ olup, benzer gerekçeler arıza oranı eğrisi altındaki alanın sonsuz olmasını gerektirir.

$$\int_0^{\infty} h(t) d(t) \rightarrow \infty$$

• **Hazard Oranı ve Güvenilirlik Fonksiyonu**⁶ Eğer t , arıza zamanı, f , arıza yoğunluk fonksiyonu, F , kümülatif yoğunluk fonksiyonu ise; f ile R arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ispat edilebilir.

$$r(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(x) d(x) \text{ her iki tarafın türevi, } \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{dF(t)}{dt} = -f(t)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \text{ de yerine konulursa,}$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \text{ elde edilir}$$

⁶ Ramiz Cepkenli, op.cit., s.7

•Genel Güvenilirlik Fonksiyonu

Bu formül yeniden düzenlenir ve her iki tarafın 0 dan t'ye kadar integrali alınırsa,

$$\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} = \int_0^t -\frac{d \ln R(t)}{dt} = -\ln R(t) \Big|_0^t$$

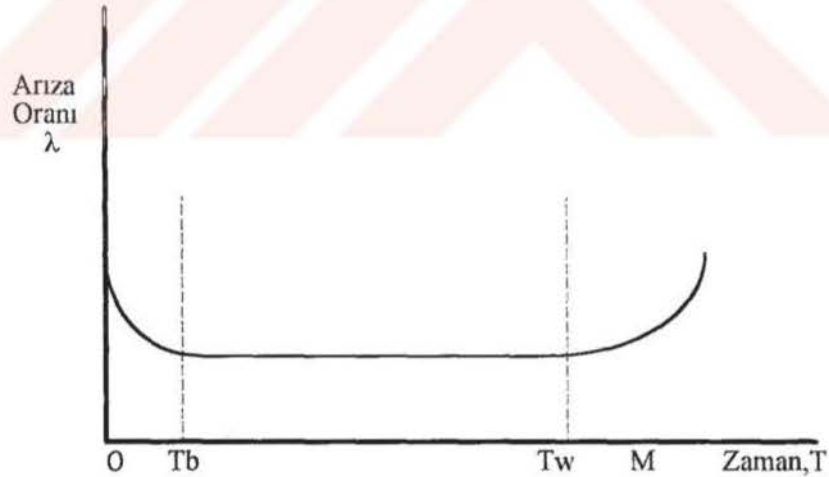
$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln R(t) + \ln R(0)$ elde edilir. t=0 anında sistem güvenilirliğin tam olduğu

göz önüne alınır ise, $R(0)=1$ olup $\ln R(0)=0$ olur. Eğer $F(0)=0$ ise bu şart geçerli olup, basitçe sıfır anında arıza olasılığının sıfıra eşitliğini belirtir. Formülde değerlerin yerine konulmasıyla genel güvenilirlik formülünün eldesi mümkündür.

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

•Hazard Oranı Eğrisi:⁷

Arıza oranının, çalışma süresine karşı olarak çizilmesiyle elde edilen **hazard oranı eğrisi**, güvenilirlik çalışmalarında bir elemanın faydalı yaşam süresinin, ortalama ömrünün gözlenebilmesi açısından önem taşımaktadır.



Şekil 3.1-Arıza Oranı Eğrisi

T=0 anında, çalışmaya başlayan sistemi oluşturan elemanların içinde içinde hatalı üretilmiş parçaların olabileceği, standardizasyon eksikliği v.b. nedenlerle , arıza oranı

⁷ Igor Bazovski, op.cit., ss. 32-33

yüksektir. Dizayn veya üretim hatalarında kaynaklandığı düşünülen yetersiz elemanlar birer birer arıza gösterirken, arıza oranı azalma gösterir. Yeni elemanlar veya sistem işletmeye tabi tutulduğu anda genellikle düşük standartta olan elemanların kısa zamanda arıza göstermesinden kaynaklanan yüksek arızanın oluşması nedeniyle bu döneme **Erken Arıza** dönemi denir.

T_b anında zayıf elemanların devre dışı kalması nedeniyle arıza oranı aşağı yukarı sabit bir değerde stabilize olur. En düşük arıza oranının sergilendiği bu dönem, kullanımı büyük avantajlar sağladığı için **Faydalı Ömür** dönemi olarak adlandırılır.

T_w anına kadar düşük oranda arıza gözlenirken, bu andan sonra **T_w** anından **M'**ye kadar çok daha yüksek arıza gözlenir. **M** zamanı ortalama eskime zamanı veya **ortalama ömür** olarak adlandırılmaktadır.

Güvenilirliğin altın kuralı: Faydalı ömür içinde arızalanan elemanların değiştirilmesi, hatta önlem olması açısından, arızalanmasa da faydalı ömrün sonuna erişmeden değiştirilmesidir.

- **Arızalar Arası Ortalama Zaman:**

Genellikle arıza modelinin tek bir parametre ile karakterize edilmesi arzu edilmektedir. Arızaya kadar geçen ortalama zaman veya arızalar arası ortalama zaman (AAOZ) bu amaçla kullanılan parametredir. AAOZ, tamir veya değiştirme işlemlerinin olduğu **yenilemeli** ortamlarda daha fazla anlam kazanmaktadır.

Eğer arızalanma zamanlarına ilişkin; t_1, t_2, \dots, t_n ömür testi verileri mevcut ise arızalar arası ortalama zaman aşağıdaki formül ile ifade edilebilir.

$$AAOZ = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

Diğer yandan, sürekli zaman rastgele değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonunun beklenen değeri, $E(t)$, arızalar arası ortalama zamanı ifade etmektedir. AAOZ'nın olasılık yoğunluk fonksiyonu ile ifadesi:

$$E(t) = AAOZ = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

Olasılık yoğunluk fonksiyonu ile güvenilirlik arasındaki $f(t) = -dR(t)/dt$ ilişkisi bu formülde yerine konulursa

$$AAOZ = - \int_0^{\infty} t \frac{dR(t)}{dt} \quad \text{elde edilir.}$$

İntegralin çözümlenmesi ve t sonsuza giderken $tR(t)$ 'nin sıfır değerine eşit olacağı göz önüne alınır ise AAOZ'nin güvenilirlik fonksiyonu ile ifade edilmesini sağlayan formül elde edilir.

$$AAOZ = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

AAOZ eğer arıza dağılımı üssel ise tek başına güvenilirliği belirlerken, diğer dağılımlarda sadece AAOZ yetersiz kalmaktadır.

Genellikle bir elemanın veya sistemin arızalar arası ortalama zamanı, $m=1/\lambda$, ortalama ömürden büyük olmaktadır. Eğer faydalı ömür dönemindeki şans arıza oranı çok düşük ise arızalar arası ortalama zaman çok yüksek olacaktır.

Arızalar arası ortalama zaman faydalı ömür döneminde bir elemana olan güvenin ifadesi olup, herhangi bir parçanın T_w zamanında daha fazla serviste kalmasına müsaade edilmez.

3.2. GÜVENİLİRLİK DAĞILIMLARI

3.2.1. ÜSSEL DAĞILIM:

Üssel dağılım; çalışma zamanında **sabit arıza oranı** karakteristiği sergileyen farklı ve/veya karışık ömür dağılımlarına sahip bileşenlerden meydana gelen karmaşık sistemlerin, cihazların, elemanların deneysel ve gözlemsel olarak zaman-arıza dağılımlarını ifade etmesi nedeniyle güvenilirlik mühendisliğinde çokça kullanılmaktadır.

Sabit arıza oranı karakteristiği gösteren arızalar, **şans tipi arıza** olarak adlandırılmakta olup, bir başka deyişle şans tipi arızaların zaman-arıza dağılımları **üsseldir**.

3.2.1.1. Üssel olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf) :

1. Tek parametrelü üssel olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf) :

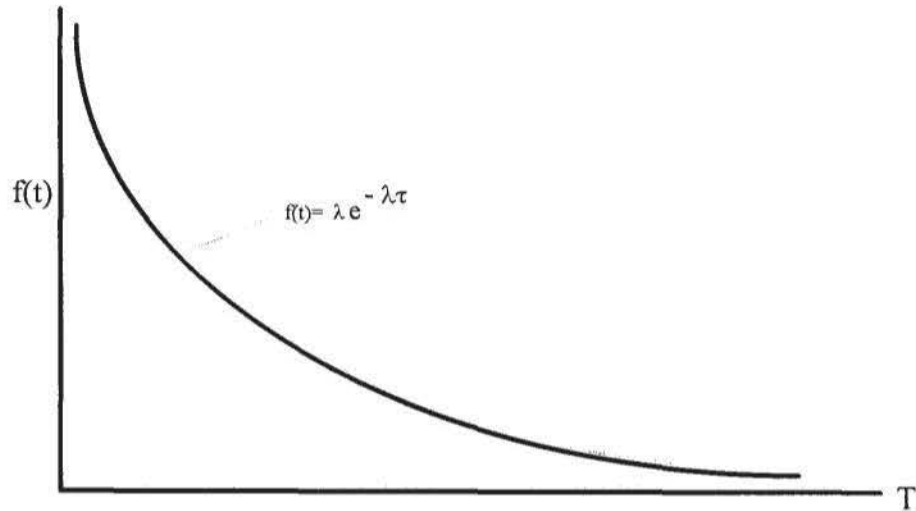
$$f(T) = \lambda e^{-\lambda T} = \frac{1}{m} e^{-\frac{T}{m}} \text{ ve } f(T) \geq 0, T \geq 0, m > 0$$

λ = Sabit arıza oranı, ölçme döneminin bir birimindeki arızalar olup, bir saatteki, bir milyon saatteki, bir milyon döngüdeki arıza miktarları örnek olarak verilebilir.

$\lambda = 1 / m$,

m = arızalar arası ortalama zaman, arızaya kadar geçen zaman

T = Çalışma zamanı, ömür veya yaşın; saat, döngü, kilometre, tur, hareket olarak ifadesi



Şekil 3.2-Tek parametrelü üssel zaman-arıza dağılımı

Bu dağılımın uygulanabilmesi için sadece tek bir parametre olan λ 'nın bilinmesi gerekir. Yukarıda görülen tek parametrelili üssel oyl'nun bazı karakteristikleri:

- Yer parametresi sıfır olup, şans arızalarının sıfır yaşta başladığını ifade eder.
- Skala parametresi λ olup azalırken dağılım sağa, artarken dağılım orjine doğru yanaşır.
- Dağılım $T = 0$ 'da $f(T=0) = \lambda$ düzeyinde başlar, üssel ve tekdüze olarak T arttıkça azalır. T , sonsuza giderken $f(T)$ sıfıra yanaşır.
- $\beta = 1, \lambda = 0$, değerlerine sahip Weibull dağılımının özel bir halidir.
- Ortalaması: $m=1/\lambda$, Medyan : $1/\lambda \cdot 0.693$, Mod : 0, Standart sapma : $1/\lambda$

2. İki parametrelili üssel olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf) :

$$f(T) = \lambda e^{-\lambda(T-\gamma)} \rightarrow f(T) \geq 0, \lambda \geq 0, T \geq \gamma$$

γ , yer parametresi olup bu tip dağılımların genel karakteristikleri:

- Yer parametresi dağılımın başlangıcını orjinin sağına kendisi kadar kaydırır. Bu demektir ki şans arızaları γ birim çalışmadan sonra ortaya çıkmaya başlar, daha önce yoktur.
- Scala parametresi $\lambda = 1/(m-\gamma)$ olup üssel oylf şekil parametresine sahip değildir.
- Dağılım $T = \gamma$ 'da $f(T=0) = \lambda$ düzeyinde başlar üssel ve tekdüze olarak T , γ 'den sonra arttıkça azalır. T , sonsuza giderken $f(T)$ sıfıra yanaşır.
- Ortalaması: $m = \gamma + 1/\lambda$, Medyan: $\gamma + 1/\lambda \cdot 0.693$, Mod : γ , Standart sapma : $1/\lambda$

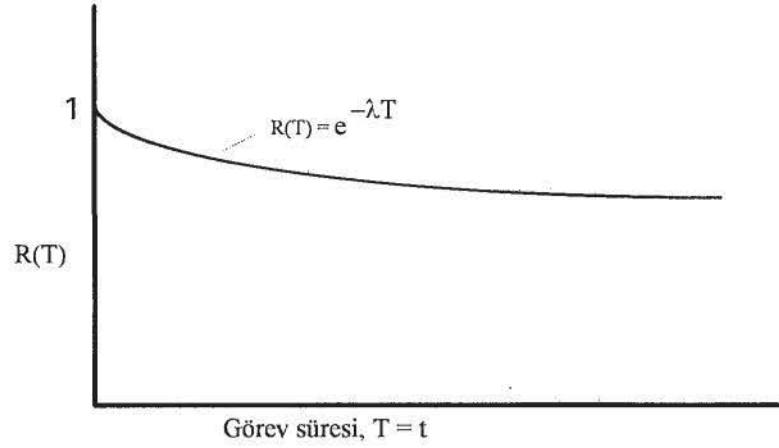
3.2.1.2. Üssel Güvenilirlik Dağılımı

1. Tek parametrelili üssel güvenilirlik fonksiyonu :

$R(T) = e^{-\lambda T}$ olup, Şekil 3.3.'de görülmektedir. Üssel kümülatif dağılım fonksiyonunun komplementi olan üssel güvenilirlik fonksiyonunu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$R(T) = 1 - Q(T) = \int_0^T f(T) dT$$

$$R(T) = 1 - \int_0^T \lambda e^{-\lambda T} dT = e^{-\lambda T}$$



Şekil 3.3-Tek parametrelü üssel güvenilirlik fonksiyonu

- Tek parametrelü üssel güvenilirlik fonksiyonunu $T = 0$ anında 1 değerinden başlar ve daha sonra tekdüze ve konveks olarak T , sonsuza giderken, güvenilirlik sıfır oluncaya kada azalır.

- $T=1/\lambda$ veya bir AAOZ döneminde güvenilirlik yüzde 36.79 değerine eşittir. Bu demektir ki bir AAOZ kadar uzun görevin güvenilirliği bağıl olarak çok düşük olup, görevlerin sadece %36.8'i başarı ile tamamlanacak veya görevi üstlenen teçhizatın %36.8'i görevlerini yerine getirecektir.

- Şartlı güvenilirlik fonksiyonu : $R(T, t) = \frac{R(T+t)}{R(T)} = \frac{e^{-\lambda(T+t)}}{e^{-\lambda T}} = e^{-\lambda t}$

Bu formülün anlamı: Sıfır yaşından itibaren T saatlik çalışma süresini tamamlamış bir bileşen veya cihazın t zaman süresince güvenilirliği, görev süresinde arıza oranı λ düzeyinde sabit kaldıkça, sadece görev süresinin fonksiyonu olup başlangıçta ve sondaki yaşa bağılı değildir.

2.İki parametrelü üssel güvenilirlik fonksiyonu :

$$R(T) = e^{-\lambda(T-\gamma)}$$

- İki parametrelü üssel güvenilirlik fonksiyonu $T=0$ değerinden $T=\gamma$ oluncaya kadar 1 düzeyinde kalır ve T sonsuza giderken, R sıfıra yanaşmaya kadar tekdüze azalır ve konveks yapıya sahiptir. $T=\gamma$ de eğim $-\lambda$ değerine eşittir.

- $T = m$ uzunluğundaki süre için güvenilirlik daima 0.367 değerine eşittir.

- Şartlı güvenilirlik fonksiyonu, $R(T, t) = e^{-\lambda t}$

3.2.1.3.Üssel Arıza Oranı ve Arızalar Arası Ortalama Zaman:

$$\text{Üssel arıza oranı : } \lambda(T) = \frac{f(T)}{R(T)} = \frac{\lambda e^{-\lambda(T-\gamma)}}{e^{-\lambda(T-\gamma)}} = \lambda$$

olup, üssel dağılımın arıza oranının, λ değerinde, her yaşta sabit olduğu durumları temsil ettiği yolundaki temel hükmü desteklemektedir.

$$\text{Ortalama ömür} = m = 1 / \lambda = \text{AAOZ}$$

eşitliği, ortalama ömrün, arıza oranının tersi ile ifade edildiği başka hiçbir hal bulunmamaktadır. Hernekadar basit veya karmaşık olursa olsun, aynı birimlerin; yaş, ömür, incelenen çalışma zamanı veya kullanım süresine bağlı olmaksızın sabit arıza oranı davranışının sergilendiği hallerde üssel dağılım geçerlidir. Bu nedenle, $\gamma=0$ ise, şans tipi arızaların ve faydalı ömür dönemi için ortalama ömür veya AAOZ değerlerinin eldesi için önce arıza oranını elde edilir, daha sonra tersi alınır. Eğer, γ sıfıra eşit değil ise, Ortalama ömür = $\gamma + 1 / \lambda$ olarak hesaplanır.

3.2.1.4.Üssel Dağılımın bazı uygulama sahaları⁸

- Birçok bileşenin ömür dağılımları erken arıza döneminden sonra eskime döneminin başlangıcına kadar üssel dağılım gösterir.
- 2.200 birleşenden daha fazlasına sahip birçok cihaz, en azından 3 kere bakım/onarıma tabit tutulmuş ise arızaya kadar geçen süre cihaz seviyesinde analiz edildiğinde sabit arıza oranı karakteristiği sergiler.,
- Kompleks, aşırı olmayan (non-redundant) sistemlerin ömür dağılımları
- Her biri kendi arıza oranına göre bozulan birçok bileşen veya alt sistemden meydana gelen karmaşık bir sistemde arızalar zaman olarak rastgele ortaya çıktığında veriler üssel dağılım takip eder.

⁸ Hahn J.Gerald J. ve Samuel Shapiro, *Statistical Models in Engineering*, (New York: 1967), ss. 105-133

3.2.5. Üssel Dağılım kullanımına dair bazı çözümler:⁹

•Şekil parametresi, β , 1 değerine sahip gamma veya Weibull dağılımının özel bir durumudur.

•Sabit oranda ortaya çıkan bağımsız olaylar arasındaki zaman dağılımı üsseldir.

•Arıza nedenlerine ait veriler, birbirinden farklı nedenlerin toplamını gösteriyor ise bu veriler üssel dağılım sergiler. Bu durum arızaya kadar geçen zaman süresinin, arızanın belirli mod ve nedenlerine bakmaksızın incelendiğinde de ortaya çıkar.

•Birçok sistem ve karmaşık bileşenler; mekanik gerilim, eskime, termik bozulma, kimyasal tükenme, korozyon gibi birçok nedenlerden dolayı arızalanabilecek eleman içerebilir. Arızaya kadar geçen zaman belirli bir arızanın nedeni olarak her eleman için ayrı ayrı analiz edilmez ise elde edilen arıza oranı oldukça tekdüze, sabittir.

•Arızalanmayan birimin gelecekteki arıza olasılığı geçmiş ile ilgili değil ise bu birimlerin arızaya kadar geçen zaman dağılımı üsseldir.

•Hiçbiri ayrı ayrı toplam arıza olasılığına fazla katkıda bulunmayan, hatta ayrı ayrı dağılımları üssel olmayan, seri güvenilirlik tarzında birçok bileşenden meydana gelen sistemlerin arızaya kadar geçen sürelerinin 'limit te' modelleri

•Bir önceki maddede anlatılan durum da olduğu gibi, eğer arızalanan parça anında aynı özelliği taşıyan parça ile değiştirildiğinde arızalar arası zaman dağılımına uygulanır.

•Eğer bir sistem birçok, örneğin 1000, seri güvenilirlik tarzında, her bileşenin aynı ve üssel olmayan arızaya kadar zaman dağılımına sahip bileşenden meydana geliyorsa sistem ömür ortalamasının yaklaşık üç katı sonra, sistem arıza oranı sabit bir değerde stabilize olabilir.

•Bazı bileşenlerin arızalanmadan önce koruyucu bakım ile değiştirildiği ve benzer olmayan bileşenlerin farklı arıza paternlerine sahip olduğu çeşitli bileşenlerin karışımı, en iyi şekilde üssel dağılımla ifade edilebilen sistem arıza paternine katkıda bulunurlar.

⁹ James R.King, *Team Easy Analysis Methods*, TEAM, C. 3, 1976'den aktaran D.Keçecioglu, ob.it., 5-70

3.2.2.WEIBULL DAĞILIMI:

3.2.2.1Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu:Weibull dağılımı, β parametresinin çeşitli değerleri için, farklı şekillerde ortaya çıktığından dolayı güvenilirlik mühendisliğinde en çok kullanılan dağılımlardan birisidir. Weibull oyf aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}}$$

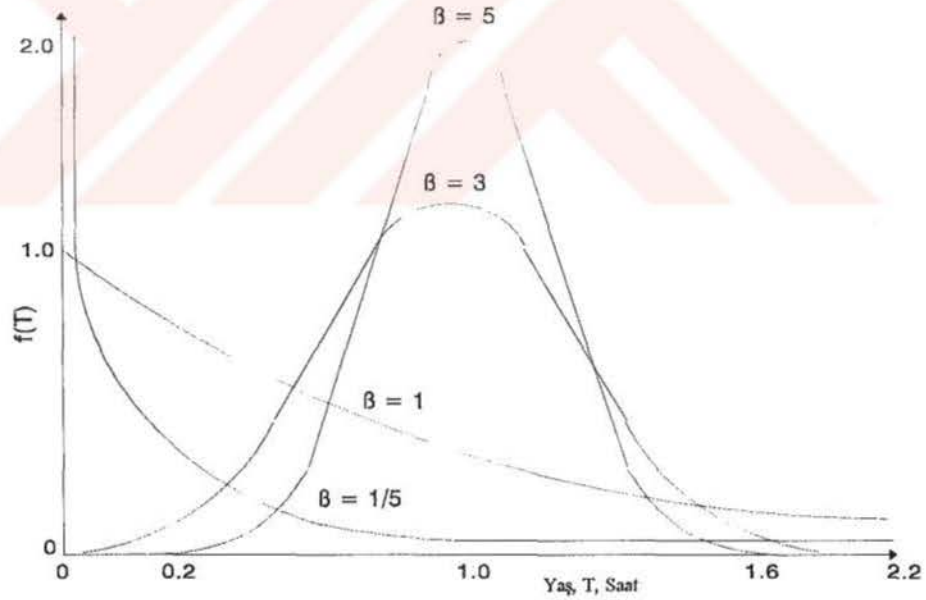
$$f(T) \geq 0, T \geq \gamma, \beta > 0, \eta > 0, -\infty < \gamma < \infty$$

β : şekil parametresi

η : Scala parametresi

γ : Yer parametresi

Aşağıdaki şekilde Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonundaki değişimleri, β , şekil parametresi, değişirken gözlemek mümkündür.



Şekil 3.4-Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu

- $0 < \beta < 1$ için T değeri γ 'ye yaklaşırken $f(T)$ sonsuza, T değeri sonsuza giderken $f(T)$ değeri sifira yaklaşmaktadır. $f(T)$ tekdüze olarak azalmakta ve T değeri γ 'den sonra artarken konveksdir.

- $\beta = 1$ değeri için iki parametrelili üssel fonksiyona dönüşmektedir

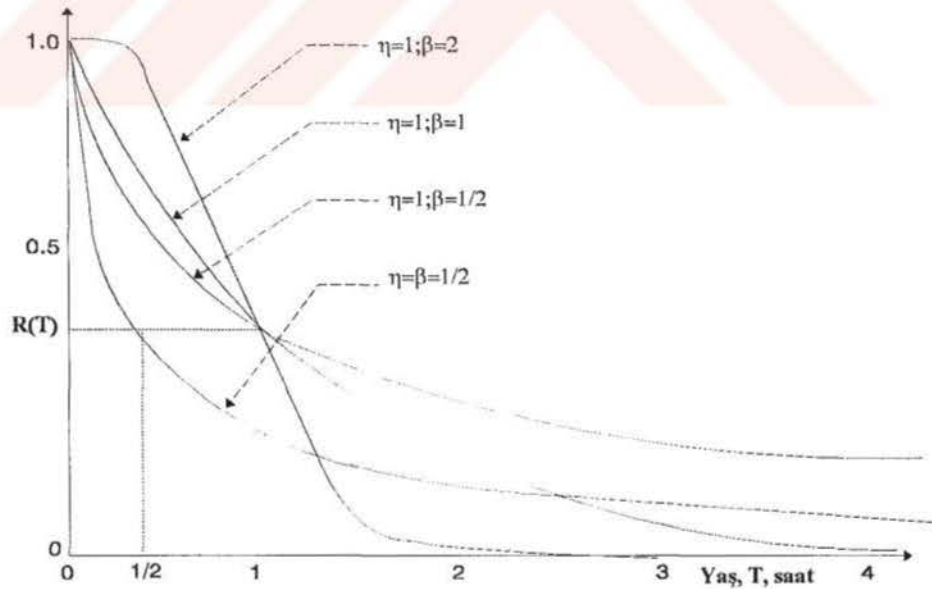
$$f(T) = \frac{1}{\eta} e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)}, \quad \gamma \geq 0, \eta > 0, T > \gamma$$

$1/\eta$: λ , şans, faydalı yaşam arıza oranıdır. $m = \eta + \gamma$ olup $T = \gamma$ 'de $f(T) = 1/\eta$ dir.

- $2.6 < \beta < 3.7$ çarpıklık katsayısı sifira yanaşırken, Weibull dağılımı da normal oyfa yaklaşmaktadır.

- β parametresi zayıf olup η ve γ parametreleri T ile saat, km, döngü, hareket v.b. gibi aynı birimler ile ifade edilir. γ parametresi bir arızanın ortaya çıkabileceği en erken tahmini zamanın belirlenmesi açısından faydalıdır. Negatif γ test öncesi üretim, depolama, nakil ve sevk aşamalarında göreve veya kullanıma başlamadan önceki arızaları gösterebilir.

3.2.2.2. Weibull Güvenilirlik Dağılımı Özellikleri:



Şekil 3.5- η ve β parametrelerinin güvenilirliğe etkisi

$R(T) = e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$ şeklinde ifade edilen ve yukarıdaki şekilde farklı scala ve şekil parametrelerine bağlı olarak çizilen Weibull güvenilirlik fonksiyonunun bazı özellikleri:¹⁰

- Fonksiyon $T = \gamma$ olduğu anda, 1 değerinden başlar ve $T > \gamma$ durumunda gittikçe azalır. T sonsuza giderken güvenilirlik de sıfıra yaklaşmaktadır. Güvenilirlik $0 < \beta < 1$ için tekdüze ve ani azalma gösterir.

- Üç Weibull oyf parametresinden bağımsız $(\gamma + \eta)$ süresince sıfır yaştan başlayan güvenilirliğin değeri 0.368 dir. Bu demektir ki tüm Weibull dağılımlarında $T = (\gamma + \eta)$ için elemanların %36.8'i arızalanmamakta, aynı η ve γ , farklı β değerleri için $R(T)$ fonksiyonları 0.368 noktasında kesişmektedir.

- Weibull şartlı olasılık fonksiyonu

$$R(T, t) = \frac{R(T+t)}{R(T)} = e^{-\left(\frac{T+t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} / e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

olup, T saatlik bir çalışmadan, yeni görevin başlamasına kadar olan güvenilirliğe eriştikten sonra t süreli yeni bir görevin güvenilirliğini ifade eder.

- Bir birimin belirli güvenilirlik değeri için sıfır yaşından başlayarak güvenilir

ömürü, $R(T) = e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$ formülünden T değerinin çözülmesi ile oluşan, aşağıdaki formül ile elde edilir.

$$T_R = \gamma + \eta \left\{ -\log_e [R(T_R)] \right\}^{1/\beta}$$

Bu değer, bir birimin $R(T_R)$ güvenilirlik ile fonksiyonlarını arızalanmadan yerine getireceği süreyi ifade eder.

3.2.2.3. Weibull Arıza Oranı Özellikleri:¹¹

Weibull arıza oranı fonksiyonu, $\lambda(T)$ aşağıdaki formül ile elde edilebilir.

$$\lambda(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

¹⁰ A:Hald, *Statistical Theory with Engineering Applications*, New York:1952

¹¹ J.H.Kao, "A new Life Quality Measure for Electron Tubes", IRE Trans. on *Reliability and Quality Control*, C.7, s.1'den aktaran Keçecioglu D., op.cit., s.6-18

• Weibull arıza oranı $0 < \beta < 1$ için $T = \gamma$ 'de ∞ değerinden başlar ve konveks olarak tekdüze azalır. Bu davranış, arıza oranlarının yaş ile azaldığı *erken tip arıza* gösteren birimlerin arıza oranlarının ifadesine uygundur.

• $\beta = 1$ değeri için arıza oranı, yaş arttıkça $1/\eta$ sabit değerine erişir. Bu durum; birimlerin *şans tipi ve faydalı yaşam dönemi* arıza oranlarının ifadesi için uygundur.

• $\beta > 1$ için, arıza oranı T arttıkça artar ve *eskime tipi* arıza sergileyen birimlerin arıza oranlarının ifadesi için uygundur.

3.2.2.4. Güvenilirlik Testini Geçme Olasılığı:

N adet birbirinin aynı birim; T saat süreli, $r < N$ birimin arızalanabilirliği şartıyla güvenilirlik tabi tutulmaktadır. Bu durumda, bu testi geçme olasılığı, r veya daha az birimin arızalanma olasılığı veya aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.¹²

$$P(k \leq r) = \sum_{k=0}^r \binom{N}{k} Q(T)^k R(T)^{N-k}$$

$R(T) = 1 - Q(T)$ olup, $Q(T)$ değerini $R(T)$ eşitliğinden veya Weibull diagramından, veya teste tabi tutulan birimlerin arızaya kadar zaman dağılımlarında elde etmek mümkündür.

3.2.2.5. Weibull Dağılımının bazı uygulamaları ve çözümler:

• Elektron tüpleri, anahtarlar, kapasitörler, germanium transistörlerin arızaya kadar zaman dağılımları Weibull ile daha iyi ifade edilebilir.

• Üssel oyl dağılımı, bir sistemin yaşam karakteristiklerini gösterirken Weibull dağılımı ise parça veya bileşenlerin yaşam karakteristiklerini tanımlar.

• Sevk sonrası iade, ilaç satış süreleri, her vardiyadaki bozulmalar Weibull dağılımı ile iyi temsil edilmektedir.

• Weibull oyl bir örneği oluşturan elemanların en zayıflarının dağılımıdır.

¹² Dimitri Keçecioglu, op.cit., s.6-71

•Erken arıza tipleri, bileşenlerin en zayıf olanlarının sebep oldukları, Weibull pdf takip etmekte olup, β ; 0 ile 1 arasındadır.¹³

•Eğer bir devredeki aynı elamanlar seri irtibatlandığında ve zaman-arıza dağılımları gamma ise devrenin zaman-arıza dağılımı Weibull olur.

• $\gamma > 0$, $\beta > 1$ parametrelerine sahip Weibull dağılımları doğal olarak eskime durumlarında ortaya çıkarlar.

3.2.3. NORMAL DAĞILIM:

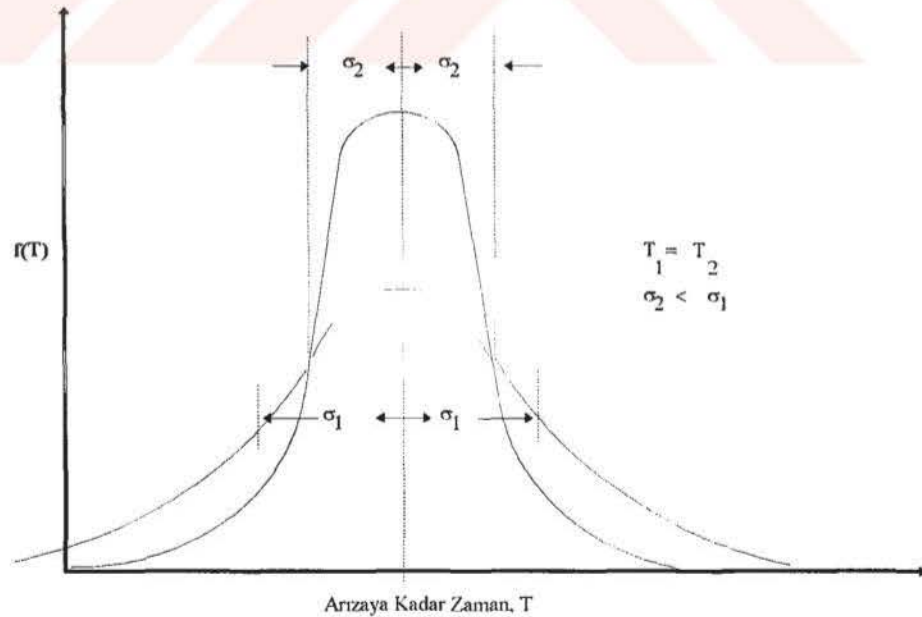
3.2.3.1. Normal Dağılımın Özellikleri: Normal dağılım en yaygın olarak kullanılmakta olup aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir.

$$f(T) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T - \bar{T}}{\sigma_T} \right)^2} \quad f(T) \geq 0, \quad -\infty < \bar{T} < \infty, \quad \sigma_T > 0$$

\bar{T} : Normal zaman - arıza dağılımının ortalaması

σ_T : Standart Sapma

Bu ifade standart sapma ve ortalama gibi iki parametrelili dağılımı ifade etmektedir.



Şekil 3.6-Ortalama ve standart sapmanın normal dağılıma etkisi

¹³ James R.King James , ibid.

Yukarıda farklı standart sapma, aynı ortalama değerleri için verilen normal dağılım eğrisinde aşağıda belirtilen özellikleri gözlemek mümkündür.

- Parametrelerden biri olan ortalama, ortalama ömür, AAOZ, m , apsis boyunca $oyfnun$ yer parametresidir. Eksi sonsuz ile artı sonsuz arasında herhangi bir değer alabilen ortalamanın değeri arttıkça; bileşenin, cihazın veya sistemin ortalama ömrü artmaktadır.
- İkinci parametre olan standart sapma, aynı zamanda skala parametresi olup değeri arttıkça eğri basılır. Standart sapma aynı zamanda ortalama ile eğrinin ikinci türevinin sıfır olduğu büküm noktası arasındaki mesafeyi ifade eder.
- Ortalaması aynı zamanda mod ve medyana eşit olan normal dağılım şekil parametresine sahip olmayıp **çan** şeklinde tek şekle sahip olup çarpıklık katsayısı 0, sivrilik katsayısı 2 veya 3 dür.

3.2.3.2. Normal Güvenilirliğin Özellikleri:

Eğer arızaya kadar geçen zamanlar, normal dağılım ile temsil edilebilir ise güvenilirliklerinin aşağıdaki formül ile hesaplanması mümkündür.

$$R(T) = \int_T^{\infty} f(T) dt = \int_{z(T)}^{\infty} \phi(z) dz$$
$$z(T) = \frac{T - \bar{T}}{\sigma_T}$$

$f(T)$: Normal OYF

T : 0'dan başlayan görev süresi

$\phi(z)$: Standart oyf

Normal oyf fonksiyonu eksi sonsuz ile artı sonsuz arasında dağılawakta olup T 'nin güvenilirliğin 1 olması için T 'nin eksi sonsuz değerini alması gerekir ki gerçek hayatta bu hal mümkün değildir. Yeni bileşen, eleman veya sistem $T=0$, anında servise girer. Netice olarak, $T \geq 0$ olduğunda, $R(T) + Q(T) \neq 1$ haline, $f(T)$, normal dağılım olduğu zaman karşılaşılar. Eğer, ortalama arızaya kadar zaman 4.5 standart sapmadan büyük olması halinde .99999'den büyük güvenilirlik için normal olf kullanılmak istenmesi durumu tavsite edilmez. Bu durumda ya otalama arızaya kadar zaman ve standart sapmanın bağıl değerlerinin kullanılması veya aşağıda belirtilen düzeltilmiş normal dağılımın kullanılması tavsiye edilir.

$$f_T(T) = \frac{1}{k' \sigma_T \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T-\bar{T}}{\sigma_T} \right)^2}$$

.T değeri sıfır ile artı sonsuz arasında değişmektedir.

.k' : Normalleştirme katsayısı $k' = \int_0^{\infty} f(T) dT$ formülü ile hesap edilir.

Aşağıdaki şekilde de görüldüğü gibi, güvenilirlik $T = 0$ anında ve 1 değerinde başlar eskime türü arızalar başlayıncaya kadar bu seviyede kalır. Eskime türü arızalar başlar başlamaz ortalama ömür değerine yaklaşılrken ani düşmeye başlar. Düşme oranı ortalama arızaya kadar zaman değerinden sonra azalır ve T sonsuza giderken sıfır değerini alır.

Normal dağılımın şartlı güvenilirliği aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$R(T, t) = \frac{R(T+t)}{R(T)} = \frac{\int_{T+t}^{\infty} f(T) dt}{\int_T^{\infty} f(T) dt}$$

3.2.3.3. Normal Arıza Oranının Özellikleri

Ani norma arıza oranı $\lambda(T) = \frac{f(T)}{R(T)}$ aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

Eğer standardize edilmiş normal dağılım kullanılıyor ise arıza oranı $\lambda(T) = \phi(z) / (\sigma_T R(T))$ formülü ile hesaplanabilir.

Eğer bir olayın arızaya kadar geçen zamanının dağılımı normal olasılık yoğunluk fonksiyonu ile ifade ediliyor ise arıza oranı yaş arttıkça artar ve gittikçe büyür. Arıza oranı $T=0$ anında sıfır değerinden başlar ve T sonsuza gittikçe kendisi de sonsuza gider.

3.2.3.4. Normal Dağılımın Bazı Uygulamaları¹⁴

- Ayakkabı, elbise, mobilye, basit elektronik parçalar, mekanik parçalar ve homojen bozulma özelliğine sahip basit parçalar için arıza-zaman dağılımlarının normal olduğu gözlenmiştir.
- Yapı elamanlarının arızalanmalarındaki gerilimin normal dağılım gösterdiği bulunmuştur.

¹⁴ R.E:Smith, E.A:Felsted,D.Keççecioğlu, "Distributions of Cycles to Failure in Simple Fatigue and The Associated Reliabilities", Annals of Assurance science, 8.Reliability and Maintainability Conference, Denver, ss.357-374

•Akkor lambaların arıza-zaman dağılımlarının normal ve ortalama ömürlerinin 1600 saat, standart sapmalarının ise 300 saat olduğu bulunmuştur.

3.2.3.5.Normal Dağılım uygulamalarına dair bazı çözümler:

- Eskime arıza oranı veya artırıcı özelliğe sahip diğer etkenler herne zaman arıza-zaman dağılımının tesbitinde göz önüne alınır ise sonuç normal dağılım olabilir.
- Bir birim artan arıza oranı özelliğine sahip ise arıza-zaman dağılımı normaldir.
- Eğer bir rastgele değişken birçok bağımsız **küçük** etkilerin toplam etkisini temsil ediyor ise değişkenin dağılımı normal olmaya eğilimlidir.
- Merkezi limit teoremine göre herhangi bir dağılıma sahip n gözlemin ortalamaları, n sonsuza giderken orjinal dağılımları ne olursa olsun, normale dağılıma yaklaşır.
- Bazı rastgele değişkenler için normal dağılım merkezde kabul edilebilir yaklaşım sağlarken, gerçek dağılımın bir veya iki ucunda yetersiz olabilir.
- Eğer eskime, sabit oranda ilerler, başlangıç ölçüleri cihazlar arasında normal dağılım gösteriyor ise, arıza-zaman dağılımı normale yaklaşır.

3.2.4. LOGNORMAL DAĞILIM:

3.2.4.1.Lognormal Dağılımın Özellikleri:

İki parametrelili lognormal dağılımının genel formülü: ¹⁵

$$f(T) = \frac{1}{T\sigma_T \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_T} \right)^2} \quad f(T) \geq 0, T \geq 0, -\infty < \bar{T}' < \infty, \sigma_T > 0, T' = \log_e T$$

T' : Arızalaya kadar geçen sürelerin doğal logaritmalarının ortalaması ve

σ_T : Arızaya kadar geçen sürelerin standart sapmasıdır.

¹⁵ Hain ve Gerald J., op.cit., ss.355

Eğer bir rastgele değişkenin logaritması normal dağılıyor ise rastgele değişkeninin dağılımı lognormaldir. Güvenilirliğin hesabında oynun altındaki alanların integral ile belirlenmesi gerekir. Fakat, lognormal oyf, standardize edilmiş normal pdf kullanıldığından, doğrudan ve kesin olarak entegre edilemez.

Lognormal oyf, $\log_e T = T'$ ile normal dağılıma dönüştürülebilir. Bu dönüşüm sonucunda ortaya çıkan normal dağılımın parametreleri; \bar{T}' ve $\sigma_{T'}$ olup, hesaplamada, lognormal dağılımın bu parametreleri ile yazılması daha uygundur.

Lognormal dağılım gösteren rastgele değişkenin logaritmaları normal dağıldığı için, dağılım aşağıdaki formül ile ifade edilebilir.

$$f(T') = \frac{1}{\sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}} \right)^2}$$

T, ölçüm birimine bağlı olarak gerçek arızaya kadar geçen zaman olup \bar{T}' ve $\sigma_{T'}$ değerlerinin hesaplanmasında $T' = \text{Log}_e T$ formülü göz önüne alınarak hesaplanır.

Normal ve lognormal oyf altındaki artış alanlar eşit olacağı için

$f(T) = f(T') dT'$ ve $T' = \text{Log}_e T$ den $dT' = dT/T$ olup $f(T) = f(T') / T$ formülü elde edilir.

Netice olarak T' ile ifade edilmiş normal dağılımın T değerine bölünmesi ile lognormal oyf elde edilir.

Lognormal pdf'in bazı belirgin özellikleri :

- Lognormal dağılım sağa çarpık olup, oyf sıfırdan başlar ve mod'a kadar artar ve sonra azalır. Aynı $\sigma_{T'}$ değerleri için T' nin ortalaması arttıkça çarpıklık artar. Büyük $\sigma_{T'}$ değerleri için eğer arıza zamanları sıfırdan az büyük ise ve daha sonraki durumlar için dikkate alınıyor ise lognormal pdf erken tip arızaları ifade edebilir.
- Lognormal oyf, büyük değerde standart sapmaya sahip ise $(\bar{T}' - k\sigma_{T'})$ negatif değer ile sonuçlanır ve bu durumda lognormal oyf'den bahsedilemez.
- Küçük $\sigma_{T'}$ değerleri için lognormal pdf, normal pdf'e yakın olup bileşen veya ürünün yaşam karakteristiklerini ifade edilebilir.

3.2.4.2. Lognormal Güvenilirliğin Karakteristikleri:

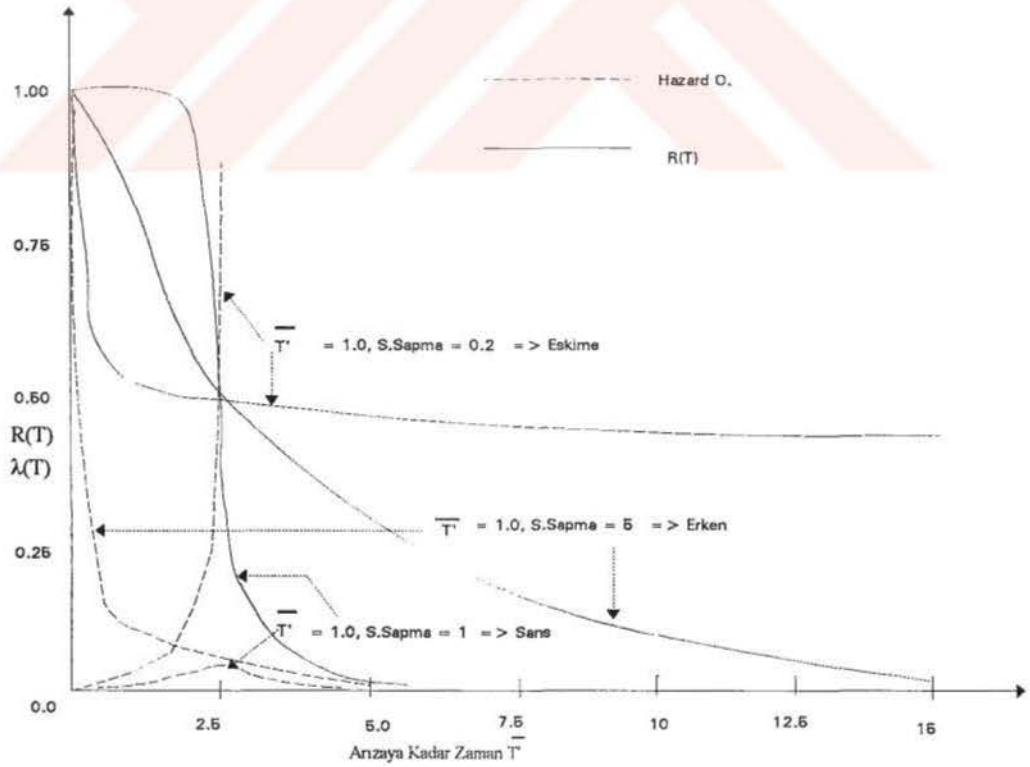
Eğer arızaya kadar geçen zaman değerleri lognormal dağılım ile ifade ediliyor ise sıfır yaşından başlayarak güvenilirlikleri aşağıdaki formül ile ifade edilebilir.

$$R(T) = \int_T^{\infty} f_{LN}(T) dT = \int_{T'}^{\infty} f_N(T') dT' = \int_{z(T')}^{\infty} \phi(z) dz$$

T, sıfır yaştan başlayan görev süresini ifade etmektedir. Yukarıdaki formül ile verilen güvenilirlik fonksiyonu T = 0 anında, 1 seviyesinde başlar ve yaklaşık $\sigma_T < 0.35$ için eskime başlayıncaya kadar konumunu muhafaza eder. Ardından keskin olarak düşer ve güvenilirlik, T sonsuza giderken, sıfıra yaklaşır. Yaklaşık olarak, ($\sigma > 0.35$) için, lognormal güvenilirlik fonksiyonu T=0 anında, bir düzeyinde başlar ve ardından keskin düşüş gösterir. T değeri sonsuza yaklaşırken, R(T) değeri sıfıra yaklaşır.

Bu durum lognormal dağılıma esneklik kazandırmakta olup, erken, üssel(faydalı dönem) aynı zamanda eskime yaşam karakteristiklerini temsil eder.

3.2.4.3. Lognormal Arıza Oranının Özellikleri



Şekil 3.7. Lognormal güvenilirlik ve Hazard oranı

Yukarıdaki şekilde görülebileceği gibi, küçük σ_T değerleri için $\lambda(T)$ yaş ile artar aynı standart sapma değerinde arızaya kadar geçen zamanın logaritmalarının daha küçük değerleri için keskinleşir. Gerçekte $\lambda(T)$, sıfırda başlar, maksimum değere ulaşır, sivrilik değerine bakmaksızın azalmaya başlar.

Lognormal oyl, yaşamın birçok devrelerine ait arızaya kadar geçen zaman değerlerini temsil edebilir.¹⁶ $\sigma_T = 0.5$ değeri için $\lambda(T)$, üssel dağılımda olduğu gibi yaşamın büyük döneminde sabit olup *faydalı yaşam döneminde* birimlerin bağıl *sabit arıza oranlarını* temsil eder. $\sigma_T \leq 0,2$ için, $\lambda(T)$ normal dağılımda olduğu gibi yaşamın büyük bölümünde artar. Fakat $\sigma_T \geq 0.8$ için arıza oranı $T = 0$ civarında dik olarak artar, fakat kısıbır çalışma döneminden sonra yaşamın büyük döneminde, erken arıza yaşam karakteristiklerini temsil eden Weibull ($0 < \beta < 1$) de olduğu gibi azalmaya devam eder. Lognormal arıza oranı ve pdf'in bu esnekliği bir çok bileşen ve ürün için uygunluğunu ifade eder.

3.2.4.4. Lognormal Dağılımın Bazı Uygulamaları¹⁷

- transistörlerin yaşam karakteristiklerinin lognormal dağıldığı tesbit edilmiştir.
- Bilhassa eskime arızalarında, mekanik cihazların arıza-zaman dağılımlarının, lognormal dağılımın iyi temsil etmektedir.
- Yatak yaşamlarının lognormal dağılım ile iyi temsil edilebileceği bulunmuştur.
- Elektriksel izolasyon yaşamı lognormal dağılmaktadır.
- Metalin makul limitlerde çok düşük dalgalı gerilim düzeylerindeki metal ve metal yorgunluğunda arıza döngüleri lognormal dağılmaktadır.

3.2.4.5. Lognormal Dağılım uygulamalarına dair bazı çözümler:

- Eğer birkaç bağımsız faktör bir olayın çıktısını katkısız olarak değil fakat faktörün miktarına ve uygulandığı andaki maddenin yaşına bağlı olarak etkiler ise, veya faktör maddenin on anki yaşı ile doğrudan orantılı ise, çıktı

¹⁶ Dimitri Keçecioğlu., op.cit., s.8-7.

¹⁷ R.E:Smith, E.A:Felsted,D.Keçecioğlu, op.cit., ss.357-374

ölçüleri yani bu maddenin arızaya kadar geçen zaman değerleri lognormal dağılmaktadır.

2. Orantılı veya katsayılı etkenlerin sonucu olan çıktı ölçüleri lognormal dağılır.

3. Eğer gözlenen değişkenin değerleri önceden gözlenenin rastgele oranları ise bu değerler lognormal dağılır.

4. Eğer bir işlemin gözlenen değerleri birçok küçük etkenlerin çarpımlarında sonuçlanıyor ise, bir anlamda etkenlerin ilavelerinin normal oyf için, bu değerlerin dağılımı lognormaldir.

5. Eğer eskime oranı bir özelliğin başlangıç ölçülerinin bir fonksiyonu ise ve eskime diğer bir özelliğe dayanarak oluşuyor ise, zaman-arıza pdf lognormal dağılıbilir.

3.3.OLASILIK VE GÜVENİLİRLİK DAĞILIMLARININ SAPTANMASI

Güvenilirlik analizi için, uygun dağılımın tesbit en önemli noktalardan biridir. Analiz sonuçlarının geçerliliği, büyük oranda gerçek zaman-arıza dağılımının seçilen dağılımca ne kadar iyi temsil edildiğine bağlıdır.

Bu işlem için belirli bir yöntem mevcut olmayıp, belirli miktardaki test verilerinin hipotez dağılıma ne ölçüde uyduğunu saptamaya yarayan istatistiksel yaklaşımlar mevcuttur. En yaygın kullanılanları Kolmogorov-Smirnov ve ki-kare testidir. Fakat, bu tip testler çok miktarda test verisini gerektirdiğinde kullanıldığı mühendislik uygulamaları kısıtlıdır.

Alternatif yol olarak medyan rankleri ve olasılık kağıtlarının kullanımınıdır. Yaşam-Test verileri artan sırada düzenlenir ve her test noktası için medyan rankleri belirlenir. Bu veri noktaları çeşitli olasılık kağıtlarında (normal, Weibull, log-normal) işaretlenir. En fazla düz çizgiye yaklaşan verilerin en iyi takip ettiği dağılımın göstergesidir. Aynı zamanda, dağılım parametrelerinin grafik tahminlerinin de bu düz çizgiden yapılması mümkündür.

3.4. KARIŞIK KİTLE GÜVENİLİRLİK ÖNGÖRÜMÜ:

Karışık kitleden elde edilen arıza verileri değişik arıza modları gösterebilir. Her mod, farklı bir dağılım takip ettiği takdirde, bu arıza modlarının ortaya çıktığı yaşam

dönemlerinin belirlenmesi gerekliliği, her biri farklı bir matematiksel işlemi gerektiren, her modun farklı istatistiksel dağılım göstermesi halinde ortaya çıkar. Diğer bir sebep ise her arıza modu bileşenin güvenilirliğini arttırmak için farklı dizayn değişikliklerini gerektirir.

Ana kitleyi, arıza modlarına göre alt gruplara ayırmak için analitik ve grafik metodlar aynı anda kullanılabilir. Grafik metod ana kitlenin, birleşik güvenilirlik, olasılık yoğunluk fonksiyonu ve arıza oranlarının tesbitinde kullanılabilir.

Örneğin, farklı zaman-arıza karakteristiklerini ve arıza oranlarını tanımlamak için çeşitli dağılımlar kullanılabilir. Azalan bir arıza oranı genellikle düşük standartta bileşenler arızalanıp ana kitleden çıkarıldığı, bileşenlerin erken ömür dönemlerinde karşılaşılır. Arıza oranı, tüm düşük standarttaki elemanların arızalanıp, devre dışı bırakılmalarına kadar azalmaya devam eder. Bu durum azalan zaman-arıza dağılımına uymakta olup, genellikle şekil parametre değeri, β , birden düşük olan Weibull dağılımı bu tip yaşam karakteristiklerini incelemede kullanılır.

Diğer tip arıza tipi ise bileşenlerin şans eseri arızalandıkları ve arıza oranlarının hemen hemen sabit olduğu durumlarda ortaya çıkabilir. Bu tip arızalara, dizayn aşamasında belirlenen düzeyin üzerinde, beklenmeyen, ani stresler neden olmaktadır. Bu gibi arızalar bir elemanın tüm yaşamı boyunca ortaya çıkabilir. Bu çeşit zaman-arıza karakteristiklerini tarif etmek için kullanılan dağılım tipleri genellikle üssel ve şekil parametresi yaklaşık olarak bir değerine eşit olan Weibull dağılımı olarak ortaya çıkar.

Diğer tip arıza ise çalışma zamanı arttıkça artan arıza oranı ile karakterize edilebilir. Genellikle eskime başladığında elemanların performansları düşmekte ve yaş arttıkça, tüm elemanlar arızalanıncaya kadar, eskime daha fazla elemanı devre dışı bırakır. Normal ve şekil parametresi birden daha büyük olan Weibull dağılımı eskime döneminde bu tip zaman-arıza dağılımını temsil etmektedir.

Değişik yaşam dönemlerinde farklı arıza modları ortaya çıkabilir. Bu durumda arıza modlarını ve bu modların dağılımlarını ve güvenilirliklerini belirlemek, her modda arızalanan birimlerin oranını ve bileşenin güvenilirliğine olan katkısının belirlenmesi gerekir. Daha sonra da bileşenin güvenilirlik fonksiyonundan olasılık yoğunluk fonksiyonu, arıza oranı ve şartlı olasılık fonksiyonu hesaplanarak güvenilirlik analizi tamamlanır.

Ana kitle güvenilirliğinin ve olasılık yoğunluk fonksiyonunun hesaplanmasında farklı dağılımlar gösteren elamanların ana kitle mevcuduna olan oranları göz önüne alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R_{1,2,\dots,n}(T) = \frac{N_1}{N} R_1(T) + \frac{N_2}{N} R_2(T) + \dots + \frac{N_n}{N} R_n(T)$$

$$f_{1,2,\dots,n}(T) = \frac{N_1}{N} \left\{ -\frac{d}{dT} [R_1(T)] \right\} + \frac{N_2}{N} \left\{ -\frac{d}{dT} [R_2(T)] \right\} + \dots + \frac{N_n}{N} \left\{ -\frac{d}{dT} [R_n(T)] \right\}$$

$$\lambda_{1,2,\dots,n}(T) = \frac{f_{1,2,\dots,n}(T)}{R_{1,2,\dots,n}(T)}$$

$$R_{1,2,\dots,n}(T, t) = \frac{R_{1,2,\dots,n}(T + t)}{R_{1,2,\dots,n}(T)}$$

3.5. ERKEN, ŞANS ve ESKİME GÜVENİLİRLİKLERİ:

Kısaca; erken yaşam, faydalı yaşam, eskime yaşam dönemi olarak adlandırılan yaşam dönemleri çoğu bileşenin yaşamında gözlenebilir.

Erken yaşam döneminde; erken ve şans tipi arızalar ortaya çıkar. Erken arızalar yetersiz imalat teknikleri, zayıf işçilik, düşük kalite kontrolü gibi nedenlerden oluşabilir. Zayıf veya düşük standartta üretilmiş elemanlar en erken arızalananlar olacaktır. Bir örnek içindeki en zayıf elemanların arıza-zaman dağılımlarının şekil parametresi bir değerinden düşük Weibull dağılımı olduğu tesbit edilmiştir. Yer parametresi sıfır veya negatif olabilir. Negatif yer parametresi arızalananların üretim, nakil, depolama esnasında veya güvenilirlik testinden önce veya kullanımına başlanmadan önce olduğunu ifade eder.

Erken arızalar için güvenilirlik aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$R_e(T) = \int_T^{\infty} f_e(T) dT = e^{-\left(\frac{T-\gamma_e}{\eta_e}\right)^{\beta_e}}$$

Şans tipi arızalar ise tasarım esnasında yetersiz emniyet faktörlerinin göz önüne alınması, beklenenden fazla yüklenme ve ümit edilenden daha düşük streslerin nedeniyle, tasarlanan mukavemet ile çalışma esnasında karşılaşılan gerilimin uyuşmamasıyla oluşur. Faydalı yaşam, bileşen veya ürünün yaşamında en düşük arıza oranı olan şans tipi arızalar ile karakterize edilir. Şans tipi arızalar ise bir bileşen veya

ürünün tüm yaşamı boyunca ortaya çıkabilir ve arıza oranları sabit olup faydalı yaşam dönemi arıza oranına eşittir. Sabit arıza oranı da üssel dağılımı ifade etmekte olup aşağıdaki formüller ile karakterize edilir.

$$\begin{aligned}f(T) &= \lambda e^{-\lambda T} \\R(T) &= e^{-\lambda T} \\R(T, t) &= e^{-\lambda t}\end{aligned}$$

λ : Şans veya faydalı yaşam dönemi arıza oranı.

Eskime yaşam dönemi şans arızaları ve eskime arızaları ile karakterize edilmekte olup, eskime arızaların nedeni; yaşlanma, yorulma, düşük tasarlanan yaşam süresi, zayıf servis, bakım, tamir ve değiştirme işlemleri olabilir. Eskime arızaları bileşenin yaşamının son dönemlerine doğru ortaya çıkmakta ve yaş ile artan arıza oranı sergiler. Eskime tipi arızalar için en çok kullanılan dağılımlar Normal ve şekil parametresi birden büyük Weibull dağılımlarıdır. Weibull oyl çok esnek yapıya sahip olup tek başına eskime arızalarını ifade etmek için en yaygın kullanılanıdır. Hatta, $2.6 < \beta < 3.7$ için Weibull oyl normale yaklaşmakta olup netice olarak Weibull dağılımı $0 < \beta < 1$ ile erken, $\beta = 1$ ile şans, $\beta > 1$ ile eskime tipi arızaları ifade etmek için kullanılabilir.

42

4. SİSTEM GÜVENİLİRLİĞİ MODELLEME VE ANALİZ TEKNİKLERİ

Bir sistemin güvenilirliğinin değerlendirilebilmesi için öncelikle sistemin fonksiyonuna en uygun şekilde modelinin kurulması gerekmektedir. Sistem fonksiyonu, yapısı, faaliyet karakteristikleri göz önüne alınarak uygun bir model tekniği seçilmelidir.



Şekil 4.1-Modelleme teknikleri

Şekil 6.1'de görülebileceği gibi eğer sistemi oluşturan elemanlar tamir edilebilme özelliğine sahip değil ise sistem faaliyeti, yapısına bağlı olarak eğer var ise atıl elemanlar dahil tüm elemanlar arızalanınca sona erer. Bu sistem sistemler için kombinasyonel modellemenin daha uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Eğer sistemi oluşturan elemanlarının tamir edilebilme özelliği var ise bu durumda iki nitelik: *arızalanma ve tamir* göz önüne alınarak sistem modellemesi yapılmak zorundadır. En uygun yolun, sistemin devamlı durum değiştirmesi göz önüne alınır, Markov modelleme olacağı değerlendirilmektedir.

Güvenilirlik modellemesinde bir diğer husus modellemenin hangi düzeyde yapılacağıdır.

1.En yüksek düzey, *sistem düzeyi* olup tüm sistem bir kutu gibi düşünülür. Arızalar hakkında verilerin detaylı olarak toplanmasından sonra sistem güvenilirlik fonksiyonunun tesbit ve analizi yapılır.

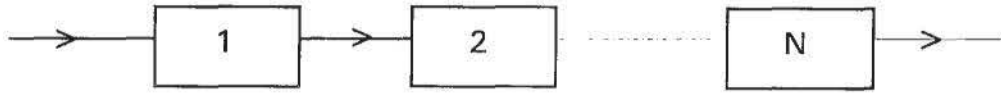
2.Bir alt düzey *modül düzeyi* olup sistem birbirinden bağımsız arızalara sahip modüller bölünür. En çok kullanılan modeller tekniğidir.

3.En düşük düzey olan *kapı* düzeyi badiren kullanılmaktadır. Eğer atıl eleman çok düşük düzeyde ise bileşenlerinde düşük düzeyde modellemesi gerekir. Örneğin bileşenler; transistör, diot, direnç gibi elemanlar ise kapı düzeyi modelleme en uygundur.

4.1. KOMBİNASYONEL MODELLEME ve ANALİZ

4.1.1. Seri sistemlerin güvenilirlikleri

Eğer birimlerden herhangi birinin arızalanması sistemin arızalanmasına neden oluyorsa, sistemin güvenilirlik açısından **seri** birimleri içerdiği kabul edilir. Diğer bir deyişle, seri bir sistemin belirlenen görevi arzu edilen süre içinde yerine getirmesi sahip olduğu tüm birimlerin bozulmamasına bağlıdır. Güvenilirlik blok diagramı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.



Şekil 6.2-Seri sistem

Olasılıksal açıdan bu tip sistemin güvenilirliği, 1. birimin başarısı veya bozulmaması ve 2'nin bozulmaması,, ve N.birimin çalışma esnasında bozulmama olasılığına eşit olup matematiksel olarak seri sistemin, R_{ss} güvenilirliği:

$$R_{ss} = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n = \prod_{i=1}^n R_i$$

R_1, R_2, \dots, R_n : 1, 2,, n. birimlerin güvenilirliğidir .

Güvenilirlikte en basit ve en yaygın olan yapı seri sistem konfigürasyondur. Tüm elemanlar sistem fonksiyonu için faal olmak zorundadır. Bir elemanın arızası, devreden çıkarılması demek olup, sistem herhangi bir elemanı arızalanmaz bozulacağı için tamir bahis konusu değildir.

Eğer i'ninci eleman T_i anında arızalanıyor ise ve elemanlarından biri arızalanır arızalanmaz sistem arızalanıyor ise, sistemin arıza zamanı :

$$T_{ss} = \min[T_i] \text{ dir.}$$

Sistemin arıza oranı fonksiyonu, her elemanın bağımsız ve arıza dağılımlarının ne olduğuna bakılmaksızın tüm elemanların arıza oranlarının toplamına eşittir.

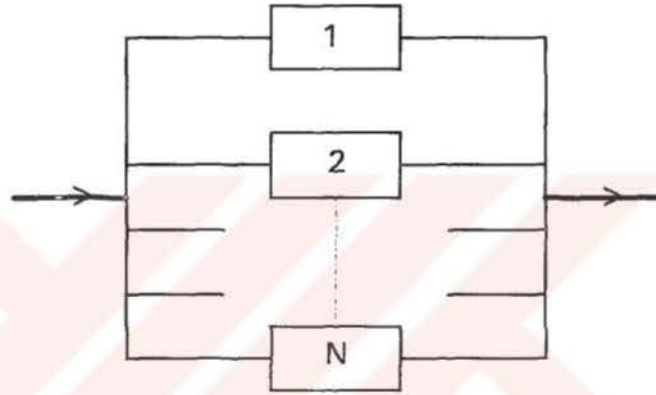
$$\lambda_{ss} = \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

Arızalar arası ortalama zaman

$$AAOZ_{ss} = \int_0^{\infty} t \cdot f_{ss}(t) dt$$
$$= \int_0^{\infty} R_{ss}(t) dt \text{ veya } \frac{1}{\lambda_{ss}} \text{ ile bulunabilir .}$$

4.1.2.Paralel sistemlerin güvenilirlikleri

Eğer bir sistemi oluşturan tüm elemanlar arızalandığında sistem arızalanıyor ise sistemin güvenilirlik açısından **paralel** olduğu söylenir. Diğer bir deyişle, seri bir sistemin belirlenen görevi arzu edilen süre içinde yerine getirmesi, sahip olduğu tüm birimlerden en az birinin bozulmamasına bağlıdır. Güvenilirlik blok diagramı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.



Şekil 6.3-Paralel sistem

Olasılıksal olarak sistemin güvensizliği, tüm elemanların arızalanması veya 1. elemanın arızalanması ve 2. elemanın arızalanması ve n. elemanın arızalanması olasılığına eşit olup sistemin güvenilirliği $R_{sp} = 1 - Q_{sp}$ ile elde edilebilir.

Matematiksel olarak sistemin güvensizliği

$$Q_{sp} = Q_1 \times Q_2 \times \dots \times Q_n$$

Güvenilirliği ise

$$R_{sp} = 1 - Q_{sp} = 1 - Q_1 \times Q_2 \times \dots \times Q_n$$
$$= 1 - \prod_{i=1}^n Q_i$$

Eğer i'ninci eleman T_i zamanında arızalanıyor ise ve elemanlardan en son arızalanandan hemen sonra sistem arızalanıyor ise, sistemin arıza zamanı :

$$T_{sp} = \max[T_i] \text{ dir.}$$

Sistemin arıza oranı fonksiyonu, her elemanın güvenilirlik ve arıza olasılık yoğunluk fonksiyonlarının bilinmesini gerektirir.

$$\lambda_{sp} = \frac{f_{sp}(t)}{R_{sp}(t)} \text{ olup, } f_{sp} = -\frac{d[R_{sp}(t)]}{dt}$$

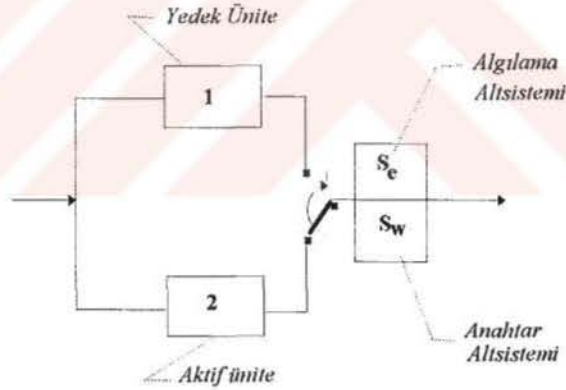
Arızalar arası ortalama zaman ise $AAOZ = \int_0^{\infty} R_{sp}(t)dt$ ile hesaplanabilir

Eğer paralel bir sistem, birbirinin aynı elemanlardan meydana geliyor ise böyle bir sistemde arızalar arası ortalama zaman:

$$AAOZ = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}$$

4.1.3. Yedek Sistemlerin Güvenilirlikleri

Bir sistemde kendisine algılama ve anahtar alt sistemleri ile çağrı yapıncaya kadar atıl yedekte bekleyen elemanlar var ise böylebir sisteme güvenilirlik açısından **yedek** (Standby) sistem denir. Paralel bir sistemde ise tüm birimler aynı anda çalışmaktadır. İki elemanlı yedek sistem; çalışan birim arızalanmadığında veya çalışan birim görevin tamamlanmasından önce arızalanır ve algılama ve anahtar alt sistemi arızalanmaz ve arızalı olmayan yedek anmayan yedek sistem görevin kalan kısmını yerine getirdiği sürece fonksiyonunu sürdürür.



Şekil 6.4-Yedek sistem

Yukarıda blok diagramı görülen yedek sistemin olasılıksal olarak güvenilirliği 1 nolu elemanın tüm t-görev süresince arızalanmaması veya t anından önceki t_1 anında arızalanması ve algılama ve anahtar altsistemlerinin t_1 anına kadar arızalanmaması ve yedek sistemin t_1 anına kadar arızalanmaması ve görevin kalan süresinde normal çalışması olasılığıdır.

$$R_y(t) = R_1(t) + \int_{t_1=0}^{t_1=t} f_1(t_1)dt_1 \cdot R_{se}(t_1) \cdot R_{sw}(t_1) \cdot R_{2q}(t_1) \cdot R_{2e}(t-t_1)$$

Eğer tüm birimler sabit arıza oranına sahip ise ve 1 numaralı birimin aktif arıza oranı λ_1 , algılama sisteminin arıza oranı λ_{se} , anahtar sisteminin arıza oranı λ_s , yedek birimin atıl arıza oranı λ_{2q} ve aktif arıza oranı λ_{2e} ise sistemin güvenilirliği :

Literatürde geçen bu form daha kapsamlı ve gerçeğe daha yakın olup bir fonksiyonel birim ve bir yedek birimden meydana gelen ve her iki birimin aynı arıza oranına sahip, algılama ve anahtar elemanlarının güvenilirliğin %100 olması halinde:

$$R_y(t) = e^{-\lambda t} + \lambda t e^{-\lambda t}$$

ile sistem güvenilirliği elde edilir. Eğer n adet birbirinin aynı elemandan meydana gelen bir yedek sistemde bir eleman fonksiyonel iken diğerlerinin atıl olması halinde AAOZ, n/ş ile hesaplanırken sistem güvenilirliğini aşağıdaki formül ile hesaplamak mümkündür.

$$R_y(T) = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!} \right]$$

4.1.4.Karmaşık Sistemlerin Güvenilirliği ¹

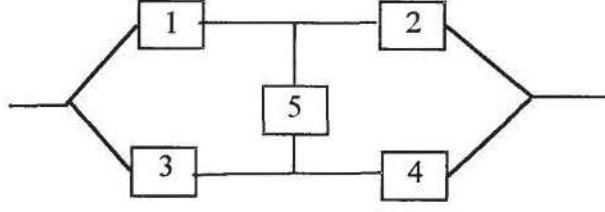
Paralel bileşenlerin basit seri kombinasyonları veya seri bileşenlerin paralel kombinasyonlarını anlamlı alt sistemlere bölerek sistem güvenilirliğinin analizi mümkündür. Ancak bazen bazı sistem dizayn konfigürasyonları veya karmaşık arıza modları sistemin paralel veya seri altsistemlere bölünebilmesini mümkün kılmayabilir. Bu gibi gerek karmaşık dizayn gerekse karmaşık arıza modlarında kullanılabilen çeşitli metodlar geliştirmiştir.

1.Minimum ayırık set tekniği:Güvenilirlik blok ağının ayırık setleri, ağdan çıkarıldığı zaman girdi ve çıktı arasındaki tüm irtibatları kesen dallar topluluğudur. Minimum ayırık setler en az öge içermekte olup tüm sistem arıları en az bir ayırık setin ağdan çıkarılması ile ifade edilebilir. Bu nedenle sistem arıza olasılığı en az bir ayırık setin arılanma olasılığıdır.

Eğer C_i , i'ninci minimum ayırık seti, \underline{C}_i , i'ninci ayırık setin arızalanmasını ifade ediyor ise sistem güvenilirliği:

$$R_s = 1 - \text{Olasılık } (\underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \dots + \underline{C}_n)$$

¹ Kyung S.Park, op.cit., s.173



Şekil 6.5-Köprü yapısı güvenilirlik bolk diagramı

Minimum ayrık set uygulamasına örnek olarak yukarıdaki sistemin güvenilirliği düşünüldüğünde mümkün ayrık setler:

$$C1 = \{13\}, C2 = \{24\}, C3 = \{153\}, C4 = \{154\}, C5 = \{254\}, C6 = \{352\}$$

C1, C2, C4 ve C6 minimum ayrık setler olup C3 ve C6 setleri C1 ve C2'yi kapsadıklarında minimum değildir. Sistem güvenilirliği olarak

$$R_s = 1 - \text{Prob}(\underline{13} + \underline{24} + \underline{154} + \underline{352}) \text{ elde edilir.}$$

$P(i) = 1 - P(i \text{ ve } P(i + j)) = P(i) + P(j) - P(ij)$ kurallarına dayanarak yukarıdaki ifade:

$$R_s = P\{12\} + P\{34\} + P\{154\} + P\{352\} - P\{1234\} - P\{1235\} - P\{1245\} - P\{1345\} - P\{2345\} + 2P\{12345\}$$

şeklinde ifade edilir.

n. Minimum bağ-set tekniği:

Bağ set, girdi ve çıktı arasında bağlantıyı oluşturan kollardan oluşmakta olup eğer izlemede bir bağ set birden fazla bağ sete dönüştürülemez ise o set minimum bağ settir. Eğer bir sistem B1, B2,, Bn bağ setlerini içeriyor ise en az bir bağ setin faal olması halinde sistemde girdi ve çıktı bağlantısı mevcut demektir. Bu durumda sistem güvenilirliği :

$$R_s = P\{B_1 + B_2 + \dots + B_n\}$$

Yukarda şekli verilen bir sistemin içereceği bağ setleri: $B1= \{12\}$, $B2=\{34\}$, $B3=\{154\}$, $B4=\{352\}$, $B5=\{1552\}$ olup $B1, B2, B3, B4$ minimum özelliğe sahip iken $B5$, üst düğüm iki kere kullanıldığı için minimum değildir. Bu durumda sistem güvenilirliği:

$$R_s = P\{12 + 34 + 154 + 352\}$$

ifadesi ile hesaplanabilir.

iii. Yapı Fonksiyonu :²

Bir sistemin performansı onu oluşturan öğelerinin performansı ile belirlenir. Bir sistem ve öğeleri arasındaki doğrusal yapısal ilişkiyi belirten fonksiyon yapı fonksiyonu olarak adlandırılır.

-Sistemin Öğeleri:

i. ögenin hali ikilik gösterge değişkeni, $x_i (1 \leq i \leq n)$, ile belirtildiğinde eğer öge fonksiyonunu normal sürdürüyor ise $x_i = 1$, aksi halde $x_i = 0$ dir.

Benzer şekilde $z(\underline{x})$ ikilik fonksiyonu de sistem halini ifade etmekte olup eğer sistem fonksiyonunu sürdürüyor ise $z(\underline{x}) = 1$, aksi halde $z(\underline{x}) = 0$ dir.

$z(\underline{x})$ fonksiyonu sistemin yapı fonksiyonu olarak adlandırılmakta, minimum kesme ve minimum yol kavramları ile ifade edilmektedir. Formül ile ifade edilmek istendiğinde :

$$\prod_{i=1}^n x_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i)$$

olup seri sistem yapı fonksiyonu : $z(\underline{x}) = \prod_{i=1}^n x_i = \min(x_1, \dots, x_n)$

paralel sistem yapı fonksiyonu : $z(\underline{x}) = \prod_{i=1}^n x_i = \max(x_1, \dots, x_n)$

-Yapının Güvenilirliği:

i. ögenin, x_i halinin öge güvenilirliği ile rastgele olduğunu farz edersek

$R_i = P\{x_i = 1\} = E[x_i]$ olup $z(\underline{x})$ yapı fonksiyonu ikilik rastgele fonksiyon olup

$R_s = P\{z(\underline{x}) = 1\} = E[z(\underline{x})]$ şeklinde ifade edilir.

Bu sistem güvenilirliği olup öğeler bağımsız olduğunda sistem güvenilirlik fonksiyonu öge güvenilirliklerinin fonksiyonu olarak $R_s = R_s(R_1, \dots, R_n)$ şeklinde ifade edilebilir.

² Kyung S.Park, op.cit., s.174

4.2.MARKOV MODELLEME

4.2.1.Ayrık ve Sürekli Sistemlerin Markov Modellemesi

Tamir arıza gibi çeşitli faaliyetleri bünyesinde bulunduran sistemlerin modellemesinde diğer modellere nazaran daha uygundur. Güvenilirlik ve hazır bulunuşluk modellemesinde *durum* ve *geçişim* olarak adlandırılan iki temel kavram mevcuttur. Bir sistemin durumu, sistemin herhangi bir andaki sistem hakkında tüm bilinenleri ifade etmek için kullanılır. Güvenilirlik modellerinde her durum *faal* ve *arıza* modüllerinin birbirinden farklı kombinasyonlarını ifade eder.

Eğer her modul faal veya arızalı diye iki şarttan birinde ise, n modüllük bir sistem 2^n adet duruma sahiptir. Zaman ilerledikçe, sistem arızalanmalara ve tamire bağlı olarak bir durumdan diğer duruma geçer. Sistemin durumundaki bu değişiklikler *geçişim* olarak adlandırılır.

Ayrık-zaman modüllerinde her geçişim sabit zaman aralıklarında gerçekleşmekte olup her geçişimin bir *olasılığı* mevcuttur.

Sürekli-zaman modellerde ise geçişim; değişken, rastgele aralıklarla gerçekleşmekte olup her olası geçişimin bir *oranı* vardır. Güvenilirlik modellerinde geçişim oranları: *Hazard Oranı*, *Tamir Oranı*, *Giderme Faktörleri* şeklinde ele alınır.

Sistemin durum değiştirme zamanının göz önüne alınmadığı Markov modellerde bir durum geçişim olasılığı sadece halihazır duruma bağlıdır. Sürekli Markov sürecinde bir durumda harcanan zaman müteakip durum olasılık dağılımını veya müteakip geçişimden önce aynı durumdaki zaman dağılımını etkilemez.

1.Ayrık Zaman Hali:

Ayrık zaman halinde bir durumda harcama süre geometrik, sürekli hald ise üsseldir.³ Genelde donanım ile ilgili Markov modelde standart olarak arıza oranlarının sabit, arızalar arası zaman üssel, arızaların ortaya çıkışı Poisson dağılım gösterdiği kabul edilmektedir. Şekil 4.5'de iki durumlu ayrık sistem modeli görülmektedir.

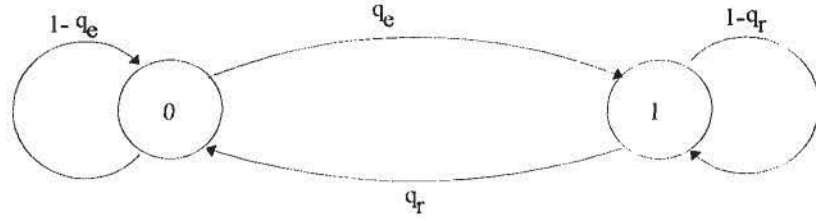
İşaretili düğüm noktaları sistem durumlarını, oklar ise geçişimi göstermektedir. Genellikle modellerle ilgili bilgiler kare matris ile ifade edilmekte olup

-Matrisin i,j . elemanı, $P_{i,j}$, i . durumdan j . duruma geçişim olasılığını ifade eder.

-Her satırın toplamı bir dir.

³ Howard, *Dynamic Probabilistic Systems*, (New York: Waley, 1971)

-Hiçbir elemanın değeri negatif olamaz.



0, 1 : Durumlar
 q_e ve q_r : Geçişim olasılıkları

Şekil 6.5-İki durumlu ayrık Markov model

Halihazır Durum	Yeni Durum	
	0	1
$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1-q_e & q_e \\ q_r & 1-q_r \end{bmatrix}$	$= P$

Vektör notasyonu ile $P(k+1) = P(k)P$

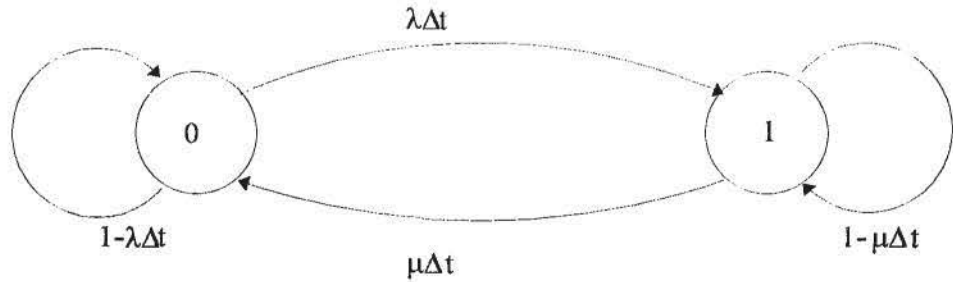
$$[P_0(k+1), P_1(k+1)] = [P_0(k) \quad P_1(k)] \begin{bmatrix} 1-q_e & q_e \\ q_r & 1-q_r \end{bmatrix}$$

Çarpım sonunda ortaya çıkan eşitlikler:

$$P_0(k+1) = (1-q_e)P_0(k) + q_r P_1(k)$$

$$P_1(k+1) = q_e P_0(k) + (1-q_r)P_1(k)$$

ii.Zaman Sürekli Markov Model:



$\lambda\Delta t, \mu\Delta t$: Durum geçişim olasılıkları

λ, μ : Durum geçişim oranları

Şekil 4.6-İki durumlu diferansiyel Markov model

Zaman sürekli Markov Model ayrık modelin zaman-adım aralığı sıfıra giderken limitinin alınması ile elde edilir. Eğer bir sistem λ sabit arıza oranı ve μ sabit tamir oranına sahip ise sistemin faal olduğu "0" durumunda olasılığı $P_0(t)$, arızalı olduğu "1" durumunda olma olasılığı $P_1(t)$ ile ifade edildiğinde geçişim aşağıdaki şekil ile ifade edilebilir.

Geçişim matrisi, $P = \begin{bmatrix} 1 - \lambda\Delta t & \lambda\Delta t \\ \mu\Delta t & 1 - \mu\Delta t \end{bmatrix}$ olup "0" veya "1" durumundan, $t + \Delta t$

zamanında bulunma olasılığı, t zamanındaki olasılığın geçişim matrisi ile çarpılmasıyla bulunur.

$$[P_0(t + \Delta t), P_1(t + \Delta t)] = [P_0(t) \quad P_1(t)] \begin{bmatrix} 1 - \lambda\Delta t & \lambda\Delta t \\ \mu\Delta t & 1 - \mu\Delta t \end{bmatrix}$$

Çarpım sonunda ortaya çıkan eşitlikler:

$$P_0(t + \Delta t) = (1 - \lambda\Delta t)P_0(t) + \mu\Delta t P_1(t)$$

$$P_1(t + \Delta t) = \lambda\Delta t P_0(t) + (1 - \mu\Delta t)P_1(t)$$

1. Durum Denklemlerinin Eldesi

Eşitliklerin tekrar düzenlenmesi ve Δt ile bölünmesi sonucu ortaya çıkan eşitliklerin Δt sıfıra giderken eşitliklerin limitini alınması ile *sistem durum denklemleri* elde edilir (Chapman-Klmogorov).

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \quad \text{ve}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_1(t + \Delta t) - P_1(t)}{\Delta t} = \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t)$$

Denklemlerin daha pratik olarak eldesi mümkündür. Eğer diferansiyel Markov modelde geçişim diagramı üzerinde Δt ve aynı durumda kalma olasılıkları gösterilmez ise diagram daha basit hale dönüşür.

Eğer $P_i(t)$, sistemin t zamanında i . durumda olma olasılığı ise $P_i(t)$ 'nin diferansiyeli aşağıdaki şekilde bulunur ⁴ :

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = (i. duruma akış - i. durumdan akış)$$

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_j \lambda_{ji} \cdot P_j - \sum_j \lambda_{ij} \cdot P_i$$

λ_{ij} : i . durumdan j . duruma geçiş olasılığı

λ_{ji} : j . durumdan i . duruma geçiş olasılığı

Yukarıda verilen eşitliklerin Laplace dönüşümü ile çözümü mümkündür.

⁴ Michael Sharpe, *General Theory of Markov Processes*, Academic Press Inc. , Boston (1991)

Bir fonksiyonun, $f(t)$, **Laplace dönüşümü**: $F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t).dt$ olup

s : Laplace dönüşüm değişkeni, t : Zaman, $f(t)$: t 'nin fonksiyonudur⁵

Durum denklemlerinin Laplace dönüşümü yapılır ise:

$$sP_0(s) - P_0(0) = -\lambda P_0(s) + \mu P_1(s)$$

$$sP_1(s) - P_1(0) = \lambda P_0(s) - \mu P_1(s)$$

elde edilen bu denklemlerde $P_0(0)$, sistemin $t=0$ anında "0" durumunda olma olasılığıdır. Sistem faaliyetine anında $t=0$ anında "0" durumunda başlayacağı için $P_0(0)=1$ ve $P_1(0) = 0$ değerlerine sahiptir.

$$sP_0(s) - 1 = -\lambda P_0(s) + \mu P_1(s)$$

$$sP_1(s) - 0 = \lambda P_0(s) - \mu P_1(s)$$

Bu denklem takımının çözümü Kramer veya Gauss eliminasyon yöntemlerinden birisi ile gerçekleştirilebilir. Sonuçta:

$$P_0(s) = \frac{s + \mu}{s(1 + \lambda s + \mu)} \quad \text{ve} \quad P_1(s) = \frac{\lambda}{s(1 + \lambda s + \mu)} \quad \text{elde edilir.}$$

Basit kesirlere ayırma ve kapatma yöntemi ile denklemler Ters Laplace dönüşümüne hazır hale getirilir.

$$P_0(s) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{s} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \frac{1}{s + \lambda + \mu} \quad \text{ve} \quad P_1(s) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \frac{1}{s} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \frac{1}{s + \lambda + \mu}$$

Ters Laplace dönüşümü ile

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \quad \text{ve} \quad P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}$$

2.Durağan Durum Olasılıkları:

Eğer sadece durağan durum olasılıklarının çözümü gerekirse durum diferansiyel denklemlerinde $dP_0(t)/dt$ ve $dP_1(t)/dt$ değerleri yerine sıfır, $P_0(t)$ ve $P_1(t)$ değerlerinin yerine ise P_0 ve P_1 konularak cebrik eşitlikler elde edilir. Bu demektir ki durağan durum halinde sistem durumunda değişiklik oranları bulunmayıp durum olasılıkları eşit değerlerine ulaşmıştır. P_0 sistemin normal faaliyetinin durağan durum olasılığı P_1 sistemin arızalı halinin durağan durum olasılığı olup $P_0 + P_1 = 1$ olduğu göz önüne alınarak,

$$0 = -\lambda P_0 + \mu P_1$$

$$0 = \lambda P_0 - \mu P_1$$

denklemlerinde bilinmeyenlerin çözümü ile $P_0 = \frac{\mu}{(\lambda + \mu)}$ elde edilir.

⁵ S. Babir Dhillon, Human Reliability with Human Factors, (New York: Pergamon Press, 1986),s.23

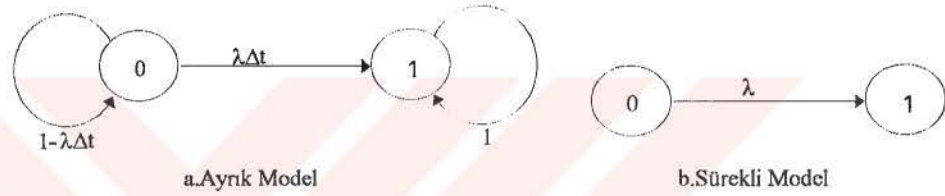
3.Sistemin hazır bulunuşluğu:

$P_0(t)$, sistemin t zamanında çalışır durumda olma olasılığı olup sistem hazır bulunuşluğu ile aynı anlama gelmektedir.

$$A_{ss} = P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

4.2.2.Güvenilirlik Fonksiyonunun Markov Modellemesi:

Sistemin arızalandığı durumu, tamir olanağına sahip olunmaması halinde, sistem faaliyet sürecinin son durumu olarak ele alıp tamir imkanlarının olmama güvenilirlik fonksiyonunun markov modellemesi yapılabilir. Sistem son duruma geçtiğinde burada başaka bir duruma akış olmayıp sistem faaliyeti sona erecek ve arızalı duruma düşecektir. Sistemin faal(0)ve arızalı(1) olarak iki duruma sahip olacağı düşünülür ise modelleri Şekil 4.7'deki gibi kurulabilir.



Şekil 4.7. Tamir edilemeyen tek sistem

$P_0(t)$: Sistemin t zamanında 0 faal durumunda olma olasılığıdır.

λ : Sistemin sabit arıza oranı

$(1 - \lambda\Delta t)$: Sistem 0 durumunda iken Δt zaman aralığında arıza yapmama olasılığıdır.

$P_0(t + \Delta t)$: $t + \Delta t$ zamanında sistemin 0 faal durumunda olma olasılığıdır.

Modeller ilgi kabuller:

1. Δt zaman aralığında bir durumdan diğer duruma birden fazla geçme olasılığı ihmal edilebilir.

2. Bir durumdan müteakip duruma Δt zaman aralığında geçme olasılığı $\lambda\Delta t$ olup, λ Markov durumları ile ilgili sabit arıza oranıdır.

3. Oluşumlar bağımsızdır.

Modelle ilgili durum denklemler:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t), \quad \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t)$$

Laplace dönüşümleri:

$$sP_0(s) - P_0(0) = -\lambda \cdot P_0(s)$$

$$sP_1(s) - P_1(0) = \lambda \cdot P_0(s)$$

$t = 0$ olduğunda başlangıç şartları $P_0(0) = 1$ ve $P_1(0) = 0$ olup, yukarıda verilen denklemlerin ile çözülmesi halinde

$$P_0(s) = \frac{1}{s + \lambda} \quad \text{ve} \quad P_1(s) = \frac{\lambda}{s(s + \lambda)} \quad \text{elde edilir.}$$

Ters Laplace dönüşüm ile t anında 0 durumunda ve 1 durumunda olma olasılıkları aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$P_0(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{ve} \quad P_1(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Güvenilirlik Fonksiyonu:

Sistemin güvenilir olması faaliyetini "0" durumunda sürdürmesi olasılığıdır.

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Arızaya Kadar Ortalama Zaman:

$$AKOZ = \int_0^{\infty} R_s(t) dt$$

AKOZ, arızaya kadar ortalama zaman değerini ifade etmekte olup $R_s(t)$ sistemin fonksiyonu, t ise zamandır.

Alternatif olarak sistemin arızaya kadar ortalama zaman değerinin Laplace dönüşümlerinden yararlanarak hesaplanması da mümkündür.

$$AKOZ = \lim_{s \rightarrow 0} R(s)$$

$R(s)$, sistem güvenilirliğinin Laplace dönüşümüdür.

Laplace Dönüşümü Son Değer Kuramı:

Bir fonksiyonun durağan durum değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Tamir edilebilir sistemlerin analizinde kullanılan bu teorem gereği

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} [s \cdot f(s)]$$

s , Laplace dönüşüm değişkeni olup, $f(s)$ ise $f(t)$ fonksiyonunun Laplace dönüşümüdür.

4.2.3. Durum Uzayı Yaklaşımı:⁶

Markov metodunda ilk olarak durumlar numaralanır. Durum olasılıkları, ardından durağan durum olasılıkları frekans dengeleme yaklaşımı ile hesaplanır.

1. Hazır bulunamama veya arıza olasılığı:

$$P_f = \sum_{i \in F} P_i$$

P_i : i durumunda olma olasılığı

F : Arıza durumlarının alt seti

2.F alt setinde karşılaşılan arıza frekansı:

$$f_f = \sum_{i \in S-F} P_i \sum_{j \in F} \lambda_{ij}$$

S : Sistem durum uzayı

λ_{ij} : i durumundan j durumuna geçişim olasılığı

3. Arıza durumu ortalama süresi:

$$d_f = \frac{P_f}{f_f}$$

Bileşenler bağımsız ise durum olasılıkları çarpım kuralı ile hesaplanabilir. Bağımlı arıza veya tamir modlarında durum olasılıklarının elde bir takım lineer denklem setinin çözümü ile elde edilir.

4.3. SİSTEM GÜVENİLİRLİĞİNDE BAYE'S TEOREMİ:

Baye's teoremi : Bir sistemin güvenilirliği seçilen bir birimin, örneğin A, iyi olması halindeki sistem güvenilirliği ile A biriminin güvenilirliğinin çarpımına, A biriminin kötü olması halindeki sistem güvenilirliği ile A biriminin güvensizliğinin çarpımının eklenmesi ile bulunur. ⁷ Matematiksel olarak:

⁶ Chanan Singh ve B.S.Dhillon, Engineering Reliability, (New York: Jhon Waley & Sons, 1981), 2.40

⁷ D.Keçecioğlu, op.cit., s.14-1

$$R_s = R_s(A \text{ iyi}) \cdot R_A + R_s(A \text{ kötü}) \cdot Q_A$$

Bayes's teoremi sistem güvensizliğini de ifade etmekte kullanılabilir.

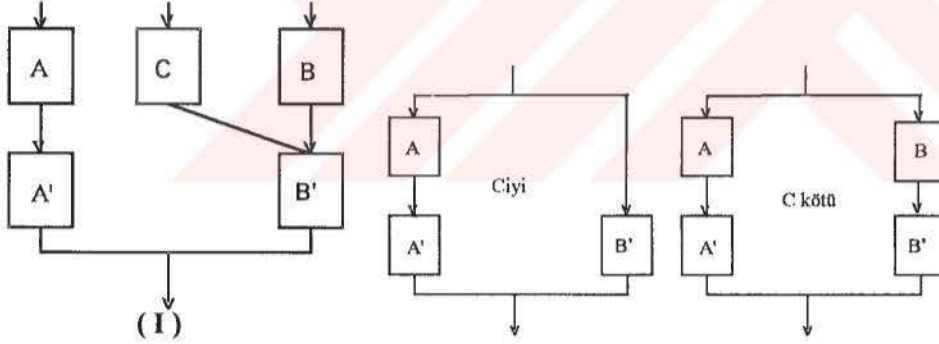
$$Q_s = Q_s(A \text{ iyi}) \cdot R_A + Q_s(A \text{ kötü}) \cdot Q_A$$

Eğer bir sistemi oluşturan birimlerin tüm kombinasyonları seri, paralel veya yedek yapıda güvenilirlik blok diagramları şeklinde veriliyor ise Bayes teoreminin bir sistemdeki birimlerin tüm kombinasyonlarına uygulanması mümkündür. Eğer birimlerin güvenilirliklerine dayalı kombinasyonlarında bir şüphe var Bayes teoreminin test amacıyla kullanılması da mümkündür.

Eğer $R_s(A \text{ iyi})$, $R_s(A \text{ kötü})$, $Q_s(A \text{ iyi})$, $Q_s(A \text{ kötü})$ ifadeleri doğrudan yazılmıyor ise aşağıdaki şekilde genişletilebilir.

$$R_s(A \text{ iyi}) = R_s(B \text{ iyi} / A \text{ iyi ise}) R_B + R_s(B \text{ kötü} / A \text{ iyi ise}) Q_B$$

Bu yordam her terimin, sistem oluşturan tüm birimlerin güvenilirlik veya güvensizliklerine dayalı olarak doğrudan yazılabilesine kadar devam eder.



Sistemin fonksiyonel olabilmesi için AA', CB' veya BB' yollarından en az birinin faal olmasını gerektiren, şekil (I)'de güvenilirlik blok diagramı verilen sistemin, Bayes's teoremine göre güvenilirlikleri bulunmak istendiğinde, C ünitesi göz önüne alınarak C'nin iyi ve kötü durumda olmasına bağlı olarak ortaya çıkan ifade:

$$R_s = R_s(C_{iyi}) \cdot R_c + R_s(C_{kötü})(1 - R_c)$$

$$R_s = [1 - (1 - R_A R_{A'}) (1 - R_{B'})] R_c + [1 - (1 - R_A R_{A'}) (1 - R_B R_{B'})] (1 - R_c)$$

4.4.FARKLI STRES DÜZEYLERİNE MARUZ SİSTEMLER

4.4.1. Arızaya Kadar Zaman Dağılımı Üssel:Eğer sistemi oluşturan birimler üzerindeki stres düzeyi değişir ise, λ arıza oranı da değişecektir. Örneğin, kalkış esnasında gerekli olan daha yüksek motor gücün nedeniyle gerilim normak seyir ve inişe nazaran daha fazla olacaktır. Bir faaliyet esnasındaki farklı dönemlerdeki stres ve buna bağlı olarak arıza oranını aşağıdaki tabloda özetlenmektedir.

TABLO I
Stres ve Arıza Oranları

No.	Dönem	Stres Düzeyi	λ
1	t_1	Kalkma	λ_1
2	t_2	Tırmanma	λ_2
3	t_3	Seyir	λ_3
4	t_4	Alçalma	λ_4
5	t_5	İnme	λ_5

Eğer motorun esas olarak faydalı yaşam döneminde olduğunu farz edersek, görev güvenilirliği:

$$R(t) = \prod_{i=1}^s R_i = R_1 * R_2 * R_3 * R_4 * R_5$$

4.4.2. Arızaya Kadar Zaman Dağılımı Weibull:

Eğer motorun arızaya kadar zaman dağılımı Weibull ise farklı gerilim düzeylerine bağlı olarak sistem güvenilirliğin eldesindeki yaklaşım.

Bir görevin süresince farklı stres düzeylerine maruz kalan bir motorun güvenilirliği,

- kalkış esnasında t_1 saat çalışabilme olasılığı ve

- t_1 saat çalışmış olması kaydıyla tırmanışta t_1 'in eşdeğerine, t_1e , ilave t_2 saat çalışma olasılığı ve

- $t_1e + t_2$ saat çalışmış olması kaydıyla, seyir esnasında ($t_1e + t_2$)'nin eşdeğerine, ($t_1e + t_2$) e , ilave t_3 saat çalışma olasılığı ve

- $(t_1e^+ t_2)_e + t_3$ saat çalışmış olması kaydıyla, alçalış esnasında $(t_1e^+ t_2)_e + t_3$ 'nin eşdeğerine, $[(t_1e^+ t_2)_e + t_3]_e$, ilave t_4 saat çalışma olasılığı ve

- $[(t_1e^+ t_2)_e + t_3]_e + t_4$ saat çalışmış olması kaydıyla, inişte $[(t_1e^+ t_2)_e + t_3]_e + t_4$ 'nin eşdeğerine, $\{[(t_1e^+ t_2)_e + t_3]_e + t_4\}_e$, ilave t_5 saat çalışma olasılığı

olarak hesaplanabilir. Yukarıda verilen formüllere dayalı olarak kısaltılmış sistem güvenilirliği:

$$R(t) = R_5 \left\{ \left[\left[(t_1e^+ t_2)_e + t_3 \right]_e + t_4 \right]_e + t_5 \right\}$$

Sistem güvenilirliğinin eldesi için görüldüğü gibi tüm eşdeğer çalışma sürelerinin hesaplanması gerekmektedir. t_1e eşdeğer çalışma süresi $R_1(t_1) = R_2(t_1e)$ varsayımı ile hesaplanabilir. Kısaca t_1e , ikinci stres düzeyi olan tırmanıştaki eşdeğer çalışma süresi olup diğer seviyelerde de aynı güvenilirliği verir.

$$e^{-\left(\frac{t_1-\gamma_1}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} = e^{-\left(\frac{t_1e-\gamma_2}{\eta_2}\right)^{\beta_2}}$$

eşitliğinin çözümü ile t_1e eşdeğer zaman değerinin ve aynı varsayım ile diğer eşdeğer zamanların bulunması mümkündür.

4.5. POISSON DAĞILIMININ SİSTEM GÜVENİLİRLİĞİNE UYGULANMASI:⁸

$$e^{-x} \left(1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots \right) = 1 \quad \text{vey}$$

$$e^{-x} + \frac{x}{1!} e^{-x} + \frac{x^2}{2!} e^{-x} + \dots + \frac{x^n}{n!} e^{-x} + \dots = 1$$

Yukarıdaki eşitlikteki herbir terim bir olasılığı ifade etmekte olup bu olasılıklarının hepsinin toplamı 1 dir. Bu nedenle toplamları 1 olan her terim bir dağılımın, Poisson dağılımı

⁸ D:Keçecioğlu , op.cit., s.14-3

olması halinde, Poisson olasılık yoğunluk fonksiyonunun birer terimidir. Bu dağılımı aşağıdaki gibi yorumlayabiliriz:

Eğer x ; bir olayın ortaya çıkma miktarının ortalama veya beklenen değeri olarak göz önüne alınırsa:

e^{-x} = eğer x sabit kalırsa bir olayın ortaya çıkmama olasılığıdır.

xe^{-x} = bir olayın sadece bir kez ortaya çıkma olasılığıdır.

$\frac{x^2}{2!}e^{-x}$ = bir olayın 2 kez ortaya çıkma olasılığıdır.

Güvenilirlikte ilgilenilen olay 'arıza' olup t süresindeki ortalama arıza miktarı:

$$x = \lambda t \quad (\text{ortalama } \lambda \text{ sabit})$$

Sonuç olarak:

$e^{-x} = e^{-\lambda t}$ sabit arıza oranına, λ , sahip tek bir sistemin güvenilirliği olup t zamanında arıza olmama olasılığını verir.

$xe^{-x} = \lambda te^{-\lambda t}$ ifadesi t süresinde sadece 1 arıza olma olasılığını ve

$\frac{x^2}{2!}e^{-x} = \frac{(\lambda t)^2}{2!}e^{-\lambda t}$, t süresince 2 arıza ortaya çıkma olasılığıdır.

Bu nedenle t süresince tam tamlamına k adet arızanın ortaya çıkma olasılığı :

$$f(k) = e^{-\lambda t} \cdot \frac{(\lambda t)^k}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Bu ifade ayrık Poisson dağılımı olup kümülatif Poisson dağılımı :

$$F(k) = P(k \text{ veya daha az arıza}) \quad \text{veya} \quad F(k) = \sum_{j=0}^k e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^j}{j!}$$

Yukarıdaki eşitlik yardımıyla elde edilecek sonuçlara bir faaliyet esnasında belirli miktardaki arızaların ortaya çıkma olasılığını belirlemek, birimlerin sabit ve eşit arıza oranlarına sahip olmaları halinde gerekli yedek miktarını ve hesaplamak için kullanılabilir.

4.6.SİSTEM GÜVENİLİRLİĞİ DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ:

Bir sistemin değerlendirme kriterleri sistemin doğrusal veya olasılıksal yapıya sahip olmasına bağlı olarak aşağıdaki tabloda gösterildiği gibi sınıflandırılabilir.

TABLO II

Sistem güvenilirliği Değerlendirme Kriterleri

<u>MODEL</u> :	<u>KRİTER</u> :
Doğrusal	En az k bileşenin arızalanması
Olasılıksal	Fonksiyonlar: Hazard Oranı- $z(t)$ Güvenilirlik- $R(t)$ Görev Süresi- $GS(t)$ Tamir Oranı- m Hazır Bulunuşluk- $A(t)$
Olasılıksal	Parametreler: Arızaya Kadar Ortalama Zaman- $AKOZ$ Tamir Ortalama Zamanı- TOZ Arızalar Arası Ortalama Zaman- $AAOZ$
Olasılıksal	Mukayeseli Ölçüler Güvenilirlik Farkı: $R_2(t)-R_1(t)$ Güvenilirlik Oranı: $R_2(t)/R_1(t)$ Görev Süresi Artışı: $GS_2(r)/GS_1(r)$ Güvenilirlik indeksi: $Log Reski/ Log Ryeni$

4.2.1.DOĞRUSAL MODEL:

Yukarıdaki tabloda görülen maddelerden en basiti doğrusal olanıdır. Bu modelde, sistem arızaya girmeksizin arızalanabilecek minimum düzeydeki bileşen arızaları göz önüne alınır. Düşük düzeydeki güvenilirliğe sahip elemanlar yerine yüksek güvenilirliğe sahip elemanların seçimini gerektirdiğinden kaynak kaybına ve dengesiz sistem tasarımlarına neden olur. Pratikte kullanımı, tek elemanın arızasının sistem arızasına sebep olamayacağıdır.

4.2.2.OLASILIKSAL MODEL:

Başlıca olasılıksal model fonksiyonları:

• **Hazard Fonksiyonu:** $z(t) = \frac{oyf}{1 - kyf}$

Elektronik parçalarda normal yaşam döneminde ⁹ arıza oranı sabit olduğu için üssel hazard oranı fonksiyonu kullanılır.

⁹ Daniel P. ve Robert S., *Reliable Computer Systems*, (Burlington:Digital Press, 1992), s.277

$$z(t) = \lambda$$

Erken ömür ve eski düzenlemelede ise genellikle Weibull fonksiyonu kullanılmaktadır.

$$z(t) = \alpha\lambda(\lambda t)^{\alpha-1}$$

• **Güvenilirlik Fonksiyonu:** Zaman sıfır olduğu anda başarılı şekilde faaliyetine başlamaya sistemin arıza göstermeksizin zamanın arzu edilen t anına kadar arızalanmadan faaliyetini sürdürme olasılığı olup

$$R(t) = e^{-\int_0^t z(x) dx}$$

• **Görev Süresi Fonksiyonu:** Görev süresi fonksiyonu $GS(f)$, sistem güvenilirliğinin belirli bir düzeyin, r, altına düştüğü zamanı ifade eder. Tamir işleminin pahalı veya mümkün olmadığı, bakım faaliyetleri arasında sabit aralığın bulunduğu durumlarda faydalıdır.

$R[GS(r)] = r$, $GS[R(t)] = t$ olup sabit arıza oranı halinde:

$$GS(r) = \frac{-\ln r}{\lambda}$$

• **Tamir oranı Fonksiyonu:** Sistem modellemelerinin daha doğru ve gerçekçi yapılmasında kullanılır. Tamir faaliyeti analitik olarak; tamir oranı, insan becerisi, teşhis olanakları, yedek parçanın bulunması gibi çeşitli faktörlerin etkisi altında olduğu için zordur.

Teorik bir takım eksikliklere rağmen olasılıksal sistemlerde, arıza oranı fonksiyonuna benzer şekilde göz önüne alınmakta, Hazard oranı fonksiyonu gibi ($Zr(t)$), incelenmektedir.

Arızada tamir oranlarını içeren sistemlerin değerlendirilmelerinde, Markov modeller daha uygundur. Tamir edilen sistemin tamir oranı, hiç arıza ortaya çıkmamış şekilde, eskisinin aynı gibi düşünülür.

• **Hazır bulunuşluluk:** Tamir edilebilen bir sistemin hazır bulunuşluluğu, herhangi bir zamanda sistemin fonksiyonlarını normal olarak sürdürüyor olma olasılığıdır. Güvenilirlik, $R(t)$, olayında belirtilen zaman öncesinde herhangi bir arıza söz konusu olabilir. Bu yönüyle güvenilirlikten farklılık gösteren hazır bulunuşluluk sonuç olarak sıfırdan büyük bir durağan durum değerine sahiptir. Arıza oranı λ ve sabit tamir oranı μ verilir ise durağan durum hazır bulunuşluluğu:

$$A_{ss} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

• **Arızaya kadar ortalama Zaman:** Sıfır zamanda normal olarak faaliyetine başlayan sistemin arızalanmasına kadar geçen ortalama zamanı ifade eder. AKOZ, güvenilirlik fonksiyonunun fonksiyonu olarak:

$$AKOZ = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

• **Tamir için ortalama zaman (TOZ):** Genellikle sistemin tamir edilebilirliğinin ölçütü olarak kullanılır. Arızalanan sistem veya alt sistemin tamiri için gereken zamanı ifade eder. Orta TOZ, tamir oranı ve AKOZ değerleri ile ilişkilidir. Üssel dağılım halinde, $AKOZ=1/\lambda$ ve $TOZ=1/\mu$ olup durağan-durum hazır bulunmuşluğu ise aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$A_{ss} = \frac{AKOZ}{TOZ + AKOZ}$$

• **Arızalar arası ortalama zaman (AAOZ):** Genellikle arızaya kadar ortalama zaman ile karıştırılır. Tamir özelliğine sahip bir sistemde arızalar arası ortalama zamanı ifade etmekte olup tamir ve arıza süreçlerinin fonksiyonu olarak:

$$AAOZ = AKOZ + TOZ \text{ şeklinde hesaplanır.}$$

• **Giderme:** Atıl kapasiteli sistemlerde genellikle nicel anlamda kullanılmakta olup belirli tip arızadan sistemin kurtulma olasılığıdır. Nitel anlamda ise bir hatanın ortaya çıkmasına neden olabilecek veya engelleyecek alt hata veya faktörler olarak ele alınır.

• **Olasılıksal Mukayese Ölçüleri:**

Değerlendirme kriterlerinin ana kullanım sahaları farklı sistem veya aynı sistemin farklı modellemelerinin mukayesesidir. Bu mukayeseler, genellikle sistemlerin ölçülen değerlerinin farkı ve oranların matematiksel olarak ek alınmasıdır.

5.İNSAN PERFORMANSI GÜVENİLİRLİĞİ

Güvenilirlik, hata olasılığının karşıtı olup insan güvenilirliği belirli sürede insanın hatasız performans gösterme olasılığı olarak düşünülebilir. Temel birim İHO veya hata oranı olup, bu ölçütlerin çeşitli şekilde birleştirilmeleriyle belirli görev veya işte insan açısından sistemin toplam güvenilirliğinin eldesi mümkündür.

Sistem güvenilirlik analizine insan güvenilirlik ölçümlerinin dahil edilebilmesi için insan performansı değerlerinin sistem değerleri ile uyumlu olarak ifadesi gerekir. Bu nedenle, insan güvenilirliği çalışmalarının amacı; sistem güvenilirliğinin elde için, cihaz güvenilirliği ölçümleri ile aynı terimlerle ifade edilen ve cihaz-alet güvenilirliği ile bir arada hesaplama ve analizlere katılabilen insan performansı güvenilirlik değerlerinin bulunmasıdır. Bu amaca ulaşıldığında insan ve güvenilirlik mühendisleri müşterek lisans kullanacaklar, insan ve makinalara aynı matematiksel kavramları uygulayacaklardır.

Doğal olarak insan makinaya nazaran daha az yeknasak ve kararlı olup performansı; psikolojik durumu, yorgunluk, öğrenme miktarı, iş ortamı, güdüleme gibi çeşitli faktörlerin tesiri altındadır. Bu faktörlerin, kontrol edilmesi veya uyarıcı girdi ve fiziksel tepki arasındaki ilişkiyi ifade eden ve kendi bünyesinde tüm psikomotor kontrol faaliyetlerini içeren insan transfer fonksiyonunun geliştirilmesinde olduğu gibi görev/saha belirgin modelleme şartı gibi uygulanması sonucunda girdiler ve çıktılar açısından insan operatörünün aynı işi yapan alet-cihaz-makina gibi ele alınması mümkündür.

İnsan hata olasılığı veya insan güvenilirliğinden yalnız insan-makine sistemlerinin güvenilirliklerinin tahmininde değil insanlı veya insansız güvenilirliklere dayanarak insan ve makina arasında fonksiyonların dağıtılmasında, hata olasılığının sayısal değerinin tesbitinde ve personel eğitim programlarının başarı oranlarının tahmini gibi çeşitli sahalarda yararlanılabilir.

İnsan güvenilirliği, verilerin; her olaydaki arızalar olarak ifade edildiği zaman-ayrık, birim zamandaki arızalar olarak ifade edildiği zaman-sürekli anlamda ele alınmalıdır.

5.1.AYRIK GÖREVLERDE İNSAN HATA OLASILIKLARI:

5.1.1.Temel Görev Hata Olasılığı:

Ayrık bir görevin; kapsamı, kesin başlangıç ve bitiş noktaları önceden tanımlanmıştır. Temel görev ise kapsamı, pratik olmaması, daha küçük davranış birimlerine bölünmesinin mümkün olmaması, tüm davranışın bir birim olarak gözlenmesinin arzu edilmesi gibi nedenlerle alt görevlere ayrılamayan görevlerdir. Ayrık görevlerdeki insan güvenilirliğinin temel ögesi, belirli görevin icrasında ortaya çıkan insan hatası olasılığıdır (İHO). Bazen insan hata oranı olarak kullanılırsa da oran kavramı bir birim zaman süresince frekansı çağrışımı yapmaktadır.

$$İHO = \frac{\text{İnsan hatası miktarı}}{\text{Hatanın ortaya çıkmasına müsait toplam hal}} = \frac{r}{n}$$

Bir görevin başarılı performans olasılığı ($1-İHO$) olarak ifade edilebilir. Bu durum, temelde başarılı cihaz güvenilirliğine benzemektedir. Eğer oran, görev başarısızlıklarını ve teşebbüs edilen miktarın tümünü içeriyor ise cihaz arızası da görevin tamamıyla başarısızlığa uğramasına sebep olabileceği için, bu durum *tüm görev* arıza olasılığının ifadesi gibi düşünülebilir. Netice olarak bu oranın çıkarılmasında cihazların sebep oldukları başarısızlıkları göz ardı ederek sadece insan hatasından kaynaklananların düşünülmesi gerekmektedir.

Yukarıdaki formülün sonucu olan olasılık, tahmini değer olup belirsizlikleri de içermektedir. Sadece elde bulunan verilere dayalı olarak hesaplanan bu değer gerçek, doğru olasılık olarak düşünülmemelidir. Gerçek olasılığın, q , r/n 'e dayalı olarak, α güven düzeyi ise $100(1-\alpha)$ güven aralığı, belirlemek istendiğinde (gerçek olasılığın alt ve üst limitleri, q_a ve q_n), yordam aşağıdaki formül ile ifade edilebilir. ¹

$$\sum_{i=r}^n \binom{n}{i} q_a^i (1-q_a)^{n-i} = \alpha / 2$$
$$\sum_{i=0}^n \binom{n}{i} q_n^i (1-q_n)^{n-i} = \alpha / 2$$

Bu formüller ile elde edilen değerler gerçek İHO'nun q_a ile q_n arasında olacağı anlamını taşır.

¹ O.Mona, "Application of Mathematics and Statistics to Reliability", Reliability Hand Book, (New York: McGraw Hill, 1966)

5.1.2.Ardışık Görev Hata Olasılığı:

Araştırmacılar², ardışık görevlerden oluşan bir faaliyetle ilgili İHO'nun öngörümü için yukarıda ifade edilen basit olasılıksal kavramını safhalı-görev olasılığı anlayışıyla genişletmişlerdir.

Bir görev fonksiyonunun yerine getirilmesi farklı tipte birden fazla görevin başarılı şekilde sonuçlanmasını gerektirdiğini farz ediniz.

j : hata modları, i :görev tipleri ve

f_{ij} : i .görevin j .hata modunda sonuçlanma olasılığı

i tipi görev, toplam görev süresi içinde m_i kez oluşmakta ise:

Hatanın ortaya çıkması, mutlaka sistemin fonksiyonunun bozulmasına neden olmayabilir. Bu nedenle eğer F_{ij} , i tip görevin, j tip hatası ortaya çıktığında sistemin arızalanmasının şartlı olasılığı ise

$f_{ij} \cdot F_{ij}$: i tip görevin, j tip arıza modunda sistem arızasına sebep olma olasılığıdır.

(i,j) kombinasyonunun sonucu olarak sistem fonksiyonunun arıza göstermeme olasılığı ise

$-f_{ij} \cdot F_{ij}$ ifadesi ile hesaplanır.

Eğer hata modları bağımsız ise i tip görevin tüm modlarında sistemin arıza göstermeme olasılığı :

$$P_i = 1 - \sum_{j=1}^{J_i} f_{ij} F_{ij} \text{ formülü ile hesaplanır .}$$

m_i kez oluşan i tip görevin tümünde sistem fonksiyonunun arıza göstermeme olasılığı:

$$P_{Ti} = P_i^{m_i}$$

n tip görev birbirinden bağımsız ise, bu görevin tüm tiplerini kapsayacak şekilde toplam başarı ve başaramama olasılığı aşağıdaki formüllerle hesaplanır

$$P_T = \prod_{i=1}^n P_{Ti} \quad Q_T = 1 - P_T$$

Aşağıdaki TABLO I'de çeşitli bilgi kaynakların elde edilen ve iki güvenilirlik uzmanının tarafsız yorumundan sonra elde edilen bazı genel İHO tahmini değerlerini

² A.D:Swain, *A Method for Performing a Human Factors Reliability Analysis*, Monograph SCR-686, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1963'den aktaran Kyung S.Park, op.cit., s.194

içermektedir. Bazı veriler doğrudan doğruya toplanan bilgilere dayalı olup diğer durumlarda görev mevcut veriler ile veya analistin tecrübesine dayalı olarak kolay ifade edilebilecek küçük davranışlara bölünmüş, bu davranış birimlerinin tahmini İHO değerleri daha büyük davranışları ifadesinde birleştirilmişlerdir.

TABLO I.
Tahmini Operatör İHO Değerleri³

Tahmini İHO	AKTİVİTE
0.0001	Tuşsuz yerine tuşlu anahtarın seçimi (operatörün durumu yanlış yorumlamasından ve tuşlu anahtarın doğru olduğuna inanmasından kaynaklanan karar hatasını içermemektedir.)
0.001	Karar hatası olmadığını farz ederek, şekli ve yeri itibariyle arzu edilen anahtara benzemeyen anahtarın seçimi
0.003	İhmal veya dikkatsizlikten kaynaklanan genel insan hatası (örneğin, etiketi yanlış okumadan dolayı yanlış anahtarın seçimi)
0.03	Kontrollerde hesaplamayı başka kağıtta tekrarlamaksızın basit aritmetik hatalar
0.01	İhmal edilen maddenin durumunu belirten göstergelerin olmaması halinde yapılan genel ihmal veya dikkatsizlik
0.1	Yanlış anahtarın seçiminden sonra, göstergelerin yanlış anahtarın doğru pozisyonda olduğuna dikkat etmeksizin pozisyonunu değiştirmesi
~1.0	Bir önceki maddede olduğu gibi fakat, yanlış seçilen anahtar arzu edilen pozisyonda değil ise
~1.0	Eğer bir operatör ardışık olarak yapılacak işlemlerde iki anahtar veya valften birini hatalı kullandıktan sonra diğerini doğru kullanmaması

³ E.W.Hagen, "Control and Instrumentation, Human Reliability Analysis", *Nuclear Safety*, C.17, No.3, Mayıs 1976

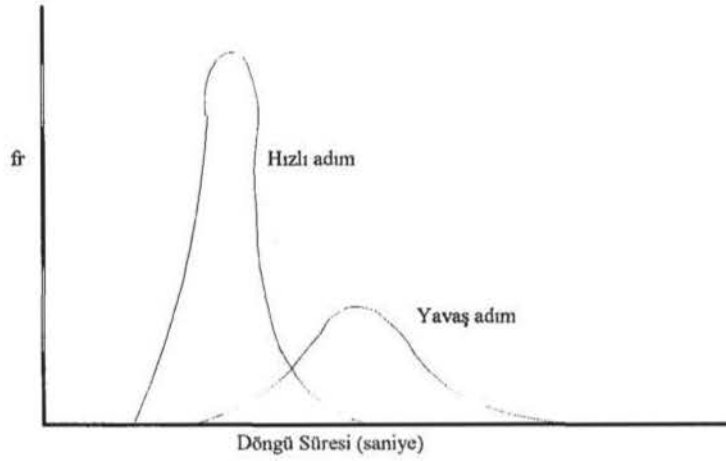
0.1	Farklı vardiyalarda çalışan personel kontrol listesi veya yazılı direktif bulunmaz ise donanımın durumunu kontrol etmede hata yaparlar
0.5	Kontrol listesi bulunmuyorsa, genelde yürüyerek yapılan gözlemlerde, gözlemcinin valf veya anahtarının arzu edilmeyen pozisyonda olması halinin tesbiti hatası
0.2-0.3	Tehlikeli faaliyetlerin hızla oluştuğu yüksek gerilim ortamlarında genel İHO
0.9	Aşırı yüksek gerilim şartlarının başlangıcından 5 dakika sonra operatör doğru hareket etmede hataya düşer
0.1	Aşırı yüksek gerilim şartlarının başlangıcından 30 dakika sonra operatör doğru hareket etmede hataya düşer
0.01	Aşırı yüksek gerilim şartlarının başlangıcından birkaç saat sonra operatör doğru hareket etmede hataya düşer

Tahmin, her ardışık düzeltici eylemlerde, bir önceki düzeltici eylemde hata var ise, normal İHO'nun iki katına çıkacağını ifade eden zaman-stres altındaki insan davranışı teorisine dayanmaktadır.

Yukarıdaki tabloda ifade edilen değerler; psikolojik stres, eğitim ve deneme, yazılı kullanım metodlarının mevcudiyeti ve kalitesi, personel fazlalığı gibi faktörlerin göz önüne alınması gereken durumların yansıtılması istendiğinde bir miktar artacaktır. Bu gibi verilerin farklı çalışma ortamlarına uygulanmasında davranış benzerliği kuralından yararlanılabilir. Cihazların birbirine benzememesine rağmen davranışlarda benzerlik olup insan davranışı farklı makinalardaki birçok eylemde aynıdır.

İHO'nun insanlar üzerindeki frekans dağılımı: İHO'nun insanlar ve çeşitli şartlardaki frekans dağılımları literatürde kesinlik kazanmamış olup genel olarak bağımlı değişkenin İHO olduğu lognormal dağılım kullanılmaktadır. Mevcut veriler, kalifiye operatörler tepki sürelerinin normal dağılım gösterdiğini desteklemekte olup, önerilen

dağılımlar rastgele seçilmiş kişilerin belirli şartlarda belirli görevlerin icrasındaki İHO'na uygulanabilmektedir.



Şekil 5.1. Kablo ekleme döngü süreleri frekans dağılımı

Thompson ve Applewhite 1968'den adapte edilmiştir.

Performans sürelerinin frekans dağılımları: Çeşitli araştırmacılar, görev performans zamanı frekans dağılımdaki pozitif sivriliğin ve genel görünümünün yukarıdaki şekile benzer olduğunu tesbit etmişlerdir. Frekans dağılım fonksiyonu, $g(t)$, rastgele başarı zamanları gösteriyor ise kümülatif dağılım fonksiyonu, $G(t)$, belirlenen zaman süresi içinde başarılı performans olasılığı anlamına gelmektedir.

$$G(t) = \int_0^t g(t) dt = P(\text{görev - süresi} \leq t) \\ = P(t \text{ süresince başarılı performans})$$

Bu durumda, performans sürelerinin frekans dağılımı, doğrudan insan hataları dağılım fonksiyonu ile rastgele arıza zamanlarını gösteren arıza yoğunluk fonksiyonundan, $f(t)$, donanım arıza dağılım fonksiyonunun, $F(t)$, çıkarılabilmesi gibi, birleştirilemez.

5.1.3. Tekrarlı Ardışık Görevlerde İnsan Güvenilirliği:

Bağımsız Denemeler: Verilen bir görevin icrasındaki bir seri tekrarlı görevlerde insan yapılması istenen hareketin yerine getirilmesinde başarısız olup insan hatasının oluşmasına neden olabilir. Bu durumda makina üzerinde çalışan kişinin hata miktarlarının teorik dağılımının veya ardışık denemelerin önerilen sırada tamamlama güvenilirliğinin

bilinmesi yararlıdır. Bazı durumlarda hata olasılıklarının sabit ve geçmiş performanslarından bağımsız oldukları kabul edilebilir. Birbirinden bağımsız ve görev performansı i'ninci denemede hata ile sonuçlandığında değeri bir aksi halde sıfır olan rastgele değişken, $(X_i=1,2, \dots)$, olması halinde, n denemede ki hataların kümülatif değerini ifade eden N_n değeri :

$$N_n = \sum_{i=1}^n x_i$$

Her denemede ki İHO, q , verildiğinde, n_1 'den n_2 'ye kadar denemeler serisinde ki kümülatif hata miktarı, $N(n_1, n_2)$, olasılıklar ile belirlenir.

$$P\{N(n_1, n_2) = k\} = \binom{n}{k} q^k (1-q)^{n-k}$$

$m = n_2 - n_1$ olup aynı period içinde ki beklenen hata miktarı

$$E[N(n_1, n_2)] = mq = (n_2 - n_1 + 1)q$$

olup her bir $n_2 \geq n_1$ için $N(n_1, n_2)$ nin belirtilen % 90 güven aralığı sınırları endüşük N_L ve N_U değerlerinin elde için aşağıda formüller kullanılır.

$$\sum_{k=0}^{N_L} P\{N(n_1, n_2) = k\} > 0.05$$

$$\sum_{k=0}^{N_U} P\{N(n_1, n_2) = k\} \geq 0.95$$

Önceden tanımlı ardışık denemelerden meydana gelen seri içinde ki n_1 den n_2 'ye hatasız performans göstermeyi ifade eden insan güvenilirliği denemelerin bağımsız olduğu farz edilirse:⁴

$$R(n_1, n_2) = P\{N(n_1, n_2) = 0\} = (1-q)^{n_2-n_1+1}$$

İnsan hatalarının tekrar vuku bulabilme özelliğinden dolayı n_1 den önce ki denemelerde meydana gelen hatalardan bağımsız olduğu farz edilmektedir. Daha önce nasıl hesaplanacağı belirtilen q_L ve q_U değerlerinin yukarıdaki formülde yerine konulması ile insan performansı güven aralığı belirlenebilir.

⁴ Kyung S.Park, "Human Reliability with probabilistic learning in discrete and continuous test", *Microelectronics and Reliability*, C.25, ss.157-166, 1985

Yorgunluk, öğrenme ve benzeri nedenlerden dolayı, q_i ile ifade edilen İHO zaman-değişken özelliğine sahip ise işlem sabit(durağan) olma özelliğini yitirmekte olup yukarıdaki formül aşağıdaki şekilde genelleştirilebilir.

$$R(n_1, n_2) = \prod_{i=n_1}^{n_2} (1 - q_i)$$

Bağımlı Denemeler:

Eğer İHO, $q_i(x_1, x_2, \dots, x_{i-1})$ ile ifade edilen geçmiş performansa bağımlılık gösteriyor ise bu durumda Markov işlemlerinden bahsedilemez. Markov olmayan zincirler hakkında halihazırda genel bir teori olmayıp her denemeye ilişkin şartlı İHO nı içeren terimlerin çarpımları ile toplam güvenilirliğin eldesi mümkün olabilir. Fakat bağımlı İHO'na ilişkin verilerin eldesi kolay değildir.

5.2. ZAMAN SÜREKLİ GÖREVLERDE İNSAN HATALARI

Gözleme, dengede tutma, takip etme gibi görevler insan faaliyetleri zaman-süreklî görevler olarak bilinmekte olup görev zaman içine yayılmıştır. Bu gibi görevlerin güvenilirliğinin modellenmesi klasik zaman-süreklî güvenilirlik modellemesine benzer.

Gözleme Görevleri: Gözlemsel faaliyet prensip olarak görsel veya duyuşsal ortamda bir ikaz veya sinyali tesbit edebilme olasılığına dayanır. Sinyal, tekbaşına bir şartın var olup olmaması olabileceği gibi, karmaşık bir paternin mevcudiyeti de olabilir. Kişinin performansı gözlem süresi, motivasyon, sinyalin tesbiti için gerekli aktivite gibi çeşitli faktörlerin etkisindedir.

Genellikle duyuşsal uyarıcılar basit alarm gibi görsel uyarıcılara nazaran daha üstündür. Bir uyarıcı sinyalin tesbit olasılığı büyük oranda sinyal frekansına bağlıdır. Sinyal frekansı arttıkça tesbit olasılığı artmakta azaldıkça azalmakta olup kişinin gözlem performansı zamana bağlı olarak belirgin şekilde azalmaktadır.

Nükleer reaktör operatörünün bir sinyalin alınmasını müteakip gerekli tuşa 4 saniye içinde basılmasına ilişkin denemeler başarısızlık olasılığının 0.01 ile 0.0001 arasında değiştiği ve sinyal oranı düşüktükçe arttığı gözlenmiştir.

İlk Hata Zamanı:

Eğer T_1 , ilk insan hatasının ortaya çıktığı zaman ise madde arıza oranına benzer şekilde ilk-insan-hata oranı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$e_1 dt = P\{t < T_1 \leq t + dt \mid T_1 > t\}$$

Doğrudan doğruya hata verilerinde ölçülebilecek ve tahmin edilebilecek olan ilk-insan-hata oranı, t değerine yakın dt kadar dar bir zaman aralığında t zamanına kadar hatasız bir performans göstermiş olması kaydıyla insan performansı hata olasılığını ifade eder.

Genel Hata Süreci: İnsan hataları rastgele tekerrür edebilen tipte olduğu için bazen hatalar artan oranda vuku bulmaya devam eder. Genellikle bu hata süreçlerini matematiksel olarak modellemek çok zordur. Bununla beraber eğer geçmişinden bağımsız artışlara sahip ise Poisson dağılımında olabilir. Yoğunluk fonksiyonu veya varış oranına benzer şekilde insan hata oranı, $e(t)$, t 'ye yakın küçük bir dt aralığında, $e(t)$, aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} e(t)dt &= P\{(t, t + dt) \text{ aralığında enaz bir hata}\} \\ &= E[(t, t + dt) \text{ aralığında hata miktarı}] \end{aligned}$$

Eğer $e(t)$, gözlem etkileri, yorulma veya öğrenme gibi nedenlerden dolayı, zaman-değişken özelliğe sahip ise, süreç homojen değildir. Eğer $e(t)$ sabit ise yenileme oranı olarak adlandırılmakta ve hata süreci homojen olup sabit insan hata oranı, toplam görev süresince ortaya çıkan hata miktarının toplam görev süresine bölünmesi ile elde edilebilir.

$$e(t) = \lambda = \frac{\text{hata miktarı}}{\text{toplam görev süresi}} = r / t \text{ formülü, maksimum tahmini insan hata}$$

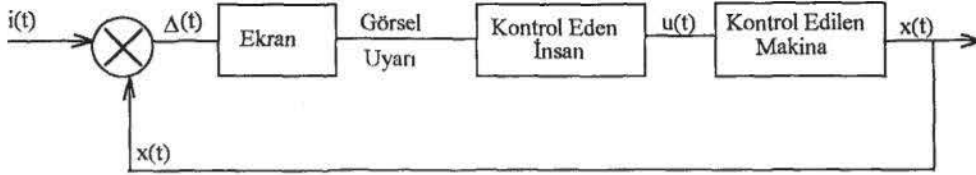
olasılığını verir.

5.3.İNSAN PERFORMANSI ETKİNLİK FONKSİYONLARI:⁵

İnsan performansının matematiksel modelinin oluşturulması çalışmalarında insan; siberetik ortamda ele alınmakta ve bir kontrol sisteminde, sistem rastgele $i(t)$ etkisine maruz kaldığı

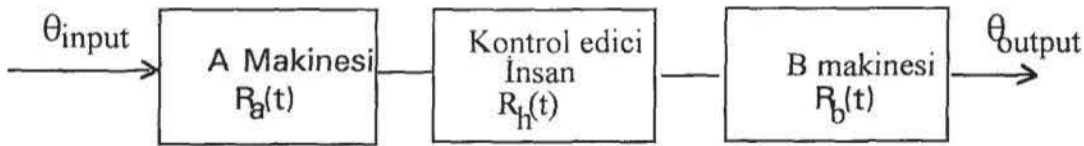
⁵ Thaddeus L.Regulinski, "Stochastic modeling of Human Performance Effectiveness Functions", Proceedings Of Annual Symposium on Reliability, ss. 407-416, IEE Catalog NO. 72CH0577-7R, California:1972

zaman sistem çıktısı olan $x(t)$ 'yi üretecek makinaryı (kontrol edilen element) harekete geçirecek, çıktısı $u(t)$ olan manipölátörün kontrolüne sahip eleman olarak görölmüştür. Aşağıdaki şekilde gösterilen; operátörün girdi ve çıktı arasındaki $\Delta(t)$ farkı en aza indirme durumu **telafi edici izleme faaliyeti** olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 6.2- Giderici kontrol sistemi fonksiyon blok diagramı

Bu gibi çalışmaların çoğunun altında yatan amaç; insan operetörü karakteristiklerini kontrol sistemleri ile uyumlu bir fonksiyon olarak tanımlamadır. Böylece çoğu tanımlama fonksiyonlarının analitik ve nümerik olarak kararlı (deterministik) sahada olduğu ortaya çıkmıştır. Otomatik kontrol disiplinindeki ani gelişmeler, sistem ve davranış bilimleri ilgili bilim adamlarını, bir anlamda güvenilirlik teorisi ile bağdaşan, stokastik (karmaşık) sahalarda insan performansı modellemesi çalışmalarına yönlendirmiştir. Tipik olarak insan; siberbetik sistem güvenilirliğinin makina ve insan güvenilirliklerinin, $R_h(t)$, bir ürünü olduğu, $R_a(t)$ ve $R_b(t)$ güvenilirliklerine sahip iki makina arasında iki makina arasında ara bağlantı olarak görölmüştür. Bu durum aşağıda olduğu gibi bir blok şema ile gösterilebilir.



Şekil 6.3-Sibernetik sistem güvenilirlik blok diagramı

En başta matematiksel karmaşıklik nedeniyle; insan performansı modelleri ,başarılı denemelerini toplam denemelere olan oranının limit fonksiyonundan elde edilen nokta olasılık fonksiyonu olarak önerilmektedir. Zaman-ayrık durumlarda önerilen modeli faydalı bir

yaklaşım iken; izleme, dengeleme veya gözleme gibi durumlarda bu gibi modeller uygulanabilir değildi. Bu bölümde gözleme ve izleme faaliyetinde bulunan insan tarafından üretilen verilere dayanılarak geliştirilmiş zaman sürekli insan performansı stokastik modelinin formülasyonuna yönelik T.L.Regulinski tarafından yürütülen çalışma sonuçları özetlenmeye çalışılacaktır. Formülasyon, Güvenilirlik ve Düzeltilebilme (telafi) olarak bilinen iki performans parametresinin tesbitine yönelik olup insan performansı **Etkenlik Fonksiyonu** olarak adlandırılmışlardır.

5.3.1. ZAMAN SÜREKLİ GÖREVLERDE İNSAN GÜVENİLİRLİĞİ⁶

İnsan hatası verilerini içeren sistem güvenilirliği analizinde genellikle ilk adım, insanlar tarafından gerçekleştirilecek büyük veya küçük çaptaki görevleri belirlemektir. Ardından, genellikle nokta tahmini olan küçük davranışsal hata oranları belirlenir ve büyük çapta davranışsal hata oranlarını saptamak amacıyla bir araya getirilir. Son olarak da cihaz arıza oranı verileri ile birleştirilerek sistem güvenilirliği hakkında öngörümde bulunulur.

İnsan hata verilerini içeren sistemin analizinde bu şekilde yapılan bir çalışma orta düzeyde olup mühendislik analiz yöntemine daha uygun model ve algoritmaların geliştirilmesine daima ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bölümde güvenilirlik mühendisliği analiz yöntemine benzer şekilde insan hatasının matematiksel olarak modellenmesinin olurluluğu incelenecektir.

Klasik güvenilirlik analizi; başaramama gözlem zamanlarının ilgili model veya modellere dönüşümü için istatistiksel tahminleri kullanır ve güvenilirliğin öngörümü, belirlenen modelden olasılık teoremi vasıtasıyla elde edilir. Bu durum, örneğin cihazın zamana dayalı olarak başaramamalarının olasılık yoğunluk fonksiyonu gibi bazı stokastik fonksiyonların bilinmesini gerektirir. Hatta klasik güvenilirlik modellemesi zaman yönünden süreklilik arzeden durumlarda "t" olarak gösterilen ve ilk-hata-ortalama-zamanı, hata-ortalama-zamanI, hatalar-arası-ortalama-zaman olarak bilinen rastgele değişkenin ilk momentini kullanır.

⁶ Thaddeus L. Regulinski ve William B. Askren, "Mathematical Modeling of Human Performans Reliability", IEEE Catalog Number 69c 8-r, Chicago, 1969

Klasik güvenilirlik modellemesinin insan verimi güvenilirliğine uygulanabilirliğinin belirlenmesinde ilk olarak insan verimi güvenilirlik ve etkenlik fonksiyonlarının matematiksel modellerinin saptanması, rastgele değişkenin (t), ilk momentinin uygunluğunun tesbiti ve ampirik örnekleme gereklidir.

1. Matematiksel model:

Zaman sürekli sahalarda cihaz davranışlarına benzeyen, klasik güvenilirlik modellemesine uygun insan performansına ilişkin faaliyetler; izleme, gözleme, kontrol ve takip gibi sürekli görevlerdir. Zaman sürekli sahalarda insan performansı güvenilirlik fonksiyonu; *görevin tabiyatından ve görev ortamından kaynaklanan strese dayalı olarak verilen bir görevin belirli zaman aralığında hatasız olarak yerine getirilme olasılığı* olarak tanımlanabilir. $Rh(t)$ olarak sembolize edilebilecek bu fonksiyon aşağıdaki şekilde formüle edilebilir.

$$Rh(t) = P\{(t_0, t) \text{ süresinde hatasız görev performansı} \setminus \text{stres}\}$$

Stres; insan performansını etkileyecek, tüm psikolojik, fizyolojik ve çevresel faktörleri kapsayacak şekilde genel anlamda kullanılmaktadır. Sürekli görevlerde, Δt zaman aralığında, t zamanına kadar hatasız performans göstermesi şartıyla insan performansı hata oranını, $e(t)\Delta t$ ile ifade edilirse, $e(t)$, güvenilirlik teorisindeki hazard oranı fonksiyonunun benzeri olan insan hata oranıdır. t süresince hatasız performans gösterme olasılığı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$e(t)\Delta t = P[(t, \Delta t)'de hata \setminus t'ye kadar hatasız performans]$$

$e(t)$: Hata oranı

A : t 'ye kadar hatasız performans, bir başka deyişle insan performansının zamanın fonksiyonu olarak güvenilirliği,

B : $(t, \Delta t)$ aralığında hatanın ortaya çıkması şeklinde tarif edilir ise:

$$P(A) = Rh(t) \text{ ve } P(B \setminus A) = e(t) \Delta t \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

Eğer güvenilirliği t 'ye kadar hatasız performans göstermesi kaydıyla $(t, \Delta t)$ aralığında da hata göstermeme olasılığı olarak düşünüldüğünde $P(A \cap B')$ olasılık durumu ortaya çıkar.

B' : Hatanın $(t+\Delta t)$ aralığında ortaya çıkmama olasılığı

$$P[\bar{B}|A]P(A) = [1 - P(B|A)]P(A) = R_h(t + \Delta t) \text{ olur.}$$

yukarıdaki eşitliklerin yerine konulması ile

$$(1 - e^{-\lambda \Delta t}) R_h(t) = R_h(t + \Delta t) \text{ elde edilir.}$$

İfade yeniden düzenlenir ise

$$-e^{-\lambda t} R_h(t) = \frac{R_h(t + \Delta t) - R_h(t)}{\Delta t} \text{ elde edilir.}$$

Türev tanımından yukarıdaki ifade şu şekle dönüşür:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -e^{-\lambda t} R(t) \quad \text{veya} \quad \frac{dR(t)}{d(t)} = -e^{-\lambda t} dt$$

Sıfır anında güvenilirliğin değerinin bir olduğu göz önüne alınarak yukarıdaki ifadenin çift taraflı integrali :

$$\int_1^{R(t)} \frac{dR(t)}{R(t)} = - \int_0^t e^{-\lambda t} dt \text{ ifadesinin çözülmesi ile}$$

Bu formül de insan performansı güvenilirlik fonksiyonunun genel ifadesi ile sonuçlanır.

$$R_h(t) = e^{-\int_0^t e^{-\lambda t} dt}$$

Bu eşitlik tamamıyla genel olup hata oranı, $e(t)$, zamana göre değişip değişmese de sürekli görevlerde insan performansı güvenilirliği için geliştirilmiş model olarak önerilir.

Klasik güvenilirlik teorisinde, cihaz güvenilirliği analizinde en çok kullanılan üç kıymetlendirici; Arızaya Kadar Ortalama Zaman (AKOZ), İlk Arızaya Kadar Ortalama Zaman (İAKOZ), Arızalar Arası Ortalama Zaman (AAOZ) olup bu terimler farklı şeyleri tanımlamakta ve bazen güvenilirlik analistlerince yorumları farklılık arz etmektedir.

İnsandan kaynaklanan arızaya kadar ortalama zaman klasik AKOZ: olarak yorumlanıp bir veya daha fazla kişi tarafından gerçekleştirilen; füze yakıt tankının aşırı yüklenmesi, veya uçağı indirirken aşırı alçalma, fırlatma sandalyesinin dikkatsizce kullanımı gibi sürekli görevlerde, görevlerdeki hata veya hataların toplamı sonucu ortaya çıkan arıza veya hata fonksiyonunun tanım için kullanılabilir.

İlk insan hatasına kadar ortalama zaman, klasik anlamda İAKOZ'ın karşılığı olup, radar ekranında hedefi tesbitte başarısızlık, bakım öncesi fırlatma sandalyesinin emniyet

pimini takmama gibi maliyet veya güvenlik açısından ilk insan hatasının oluşumunun çok kritik olduğu sahalarda kullanılır.

İnsan hataları arası ortalama zaman klasik güvenilirlik teorisindeki AAOZ'ın karşılığı olup, örneğin üretim hattında insan hatalarından kaynaklanan kusurlu parça ölçümlerindeki gibi insan hatalarının çok kritik olmadığı sahalarda kullanılabilir.

ii. Deneysel Yöntem ve Analitik Metodoloji

•**Deneysel Yöntem:** Zaman sürekli görev modelinde insan hatası verileri elde etmek için laboratuvar ortamında uygulanan basit gözlem görevi modeli test uygulanmış ve ilk hataya kadar geçen zaman süreleri kayıt edilmiştir. Öğrenme ve yorgunluk gibi faktörlerin ortadan kaldırılması için zaman yönünden kısıtlamalara gidilen bu modelde operatörden ekrandaki saat görünümünde ışıkları içeren ekranı izlemesi ve herhangi bir ışık sönmeye kumanda edilen anahtara basması istenmiştir. Yirmi ışığın birbiri ardışına yaklaşık birer saniye aralıklarla yanıp sönmeleri programlanmıştır. Işık rengi, kesafeti ve süresi insan algılama eşiğinin üzerindedir. Ardışık yanıp sönmelerde ışıktaki arıza en az birkaç turda bir veya en fazla bir turda beş veya altı olacak şekilde rastgele olarak programlanmıştır. Görev yaklaşık olarak otuz dakika süreli olup deneye katılanları çevre gürültüsünden arındırmak için hafif ses kulaklıkları takılmış, deney öncesi görevin içeriği hakkında standart briefing verilmiş, deney öncesi ilk öğrenmeyle ilgili hataları en aza indirmek için iki dakika alıştırma süresi tanınmıştır. Deneyden elde edilen veriler gözleme görevlerine uygunluk gösteren iki tipte ilk-hata-zamanını içermektedir

1. Kaçırma hatası: Kişi hatalı ışığı farkedememiştir,
2. Yanlış ikaz hatası: Kişi, gerçekte ışık hatalı olmamasına rağmen hatalıymiş gibi davranmıştır.

Her kişinin hatalı ışığa vermiş olduğu cevap zamanı kalibreli teybe kaydedilmiş ve test 51 erkek ve dişi kolej öğrencisine ve hava kuvvetleri personeline uygulanmıştır.

• Analitik Metodoloji:

İnsan performansına dayalı hata gözlemlerinin zaman dağılımlarını tanımlamak için olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(t)$, kümülatif olasılık dağılımı $F(t)$ ve hata (hazard) oranı $e(t)$ gibi çeşitli fonksiyonlar kullanılabilir. Bu üç fonksiyon arasındaki ilişki şu şekilde gösterilebilir:

$$e(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad \text{ve} \quad F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

Güvenilirlik fonksiyonu hazard oranı veya aşağıda verildiği gibi olasılık yoğunluk fonksiyonu ile ifade edilebilir.

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad \text{olup beklenen değerler}$$

$$m = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad \text{veya} \quad m = \int_t^{\infty} R(t) dt$$

Yukarıda belirtilen formüller yardımıyla her tür hata zamanı yoğunluk fonksiyonuna ilişkin güvenilirlik fonksiyonu ve hata oranının eldesi mümkündür. Hata zamanı olasılık yoğunluk fonksiyonu değerlerinin belirlenmesi için yapılan çalışmada grafik yöntem uygulanmış, önce fonksiyon , ardından parametreler ve diğer veriler belirlenmiştir. Yöntem hata gözlem zamanlarının t_1, t_2, \dots, t_n özel olasılık kağıdına belirli pozisyonlarda kaydını gerektirir. t'nin gözlenen değerleri, tahmin edilen F(t) dağılımını oluşturduğunda, t ve F(t) arasındaki ilişki aşağıda belirtildiği gibi bağımsız değişkenin Lnt, eğimin A ve kesme değerinin B olduğu lineer eşitlik şeklinde olduğu kabul edilir.

$$\ln\{1 / R(t)\} = A \ln t + B$$

Gözlem değerleri dar bir alanda dağıldığında, düz bir doğru işaretlenen gözlem değerline çok iyi uyum gösterebilir. Uyumsuzluk halinde, farz edilen olasılık yoğunluk fonksiyonunun kabul veya reddinde de şüphe var demektir. Bu durum herhangi bir Kolmogorov-Smirnov hipotez testi gibi uyum testlerinin kullanımını gerektirir.

Olasılık kağıdının seçimi seçimi, gözlenecek verilerin modeline dayalı olarak belirlenmekte olup örneğin; eğer gözlenen veriler sabit hata oranını içeriyorsa yarı logaritmik kağıt kullanılabilir. Hata Oranlarının zamana bağlı olarak değişmesi halinde fonksiyonun kestirilmesi ve buna bağlı olarak olasılık kağıdının seçiminde kesinlik yoktur. Örneğin, azalan hata oranı; Weibull veya Gamma kağıdının kullanımını, artan hata oranı; normal, Log-normal hatta Weibull ve gamma kağıtlarının kullanımını gerektirebilir.

Sonuç olarak Thaddeus L.Regulinski tarafından yürütülen bu deneysel çalışma sonunda ilk-kaçırma ve ilk-yanlış-ikaz hatalı zamanları ve her ikisinin karışımı tablolar

halinde belirtilmiş ve hata zamanlarının analizi hata oranlarının sabit olmadığını ortaya koyduğundan Weibull, gamma, normal ve lognormal dağılımları modelde test edilmiştir. Üssel dağılım sabit oran ile karakterize edilmesine rağmen ilave kontrol olarak kullanılmıştır.

Verilerin Weibull dağılımına uyumu grafik olarak test edilmiş ve gözlenen hata zamanları dağılım fonksiyonu, teorik dağılım fonksiyonu, iki dağılım arasındaki mutlak fark ve maksimum kabul edilebilir Kolmogorov-Smirnov d istatistiği değerlerini veren bilgisayar programı ile doğrulanmıştır. Bu durumda herhangi zaman periodu için performans güvenilirliğinin aşağıda formülü verilen Weibull yoğunluk ve güvenilirlik fonksiyonunun kullanılarak hesap edilebileceği saptanmıştır.

Thaddeus L.Regulinski ve William B. Askren tarafında yapılan bu çalışmada insan performansı güvenilirliği modellemesinin olurluluğunun araştırılması için stokastik matematik, güvenilirlik mühendisliği ve davranış bilimleri disiplinlerinden yararlanılmıştır.

$$R(t) = e^{-\int_0^t e(t) dt}$$

şeklinde belirtilen genel insan performansı matematik modelinin uygulaması ve ilk hata zamanı kavramına uyarlanması gözleme dayalı laboratuvar deneyleri ile test edilmiştir.

İlk kaçırma hatası zamanı, Yanlış İkaz Hatası Zamanı ve kaçırma ve yanlış ikaz hatalarının kombinesi klasik tahmin teorisi ile test edilmiştir. Weibull, gamma ve lognormal fonksiyonlarının bu hatalarının dağılımlarını en iyi en iyi temsil ettiği, normal ve üssel dağılımların ise red edilmesi uyum testleri sonunda ortaya çıkmıştır.

5.3.2. Düzeltibilirlik

1. Matematik Model:

İnsanın kendi ürettiği hataları düzeltme, telafi edebilme fonksiyonu olarak bilinen insan performansı etkenlik fonksiyonlarında bir olan düzeltibilirlik $Ch(t)$ şeklinde gösterilmektedir. Sürekli zaman sahalarında, görevin tabiyatından ve görev ortamından kaynaklanan strese dayalı olarak, hatanın t süresinde düzeltilme olasılığı olarak olarak tanımlanabilir. Diğer bir deyişle:

$$Ch(t)=P\{t \text{ süresinde hatanın düzeltilmesi} \setminus \text{stres}\}$$

Stres, genel anlamda insan performansını etkileyen tüm psikolojik, psikososyolojik ve çevresel faktörlerin toplamı olarak kullanılmaktadır.

Düzeltilirlik performansı fonksiyonunun formülasyonu, dengesi rastgele bozulan uçağı uçuş esnasında iki eksen de dengede tutabilme olayının simülasyonu ile elde edilen verilere dayanmaktadır. Bu deneyde⁷ kişilerden, standart E-8 tipi el yordamlı lövyeye ile, uçak dalış ve yatış göstergesine göre iki serbestlik derecesinde kumanda etmesi istenmiştir. Lövyenin ileri ve geri hareketi göstergedeki dikey dalış değişimini, saha ve sola hareketi yatay yatış değişimini sağlamıştır. Amaç; 0.04 Khz lik filtre edilmiş düşük frekanstaki ses altında, iki göstergelyi her eksen için ayrı ayrı belirlenmiş limitler altında tutmaktır. Ayar limitlerini geçiş, hata zamanını belirlemiş ve hatta hata düzeltme zamanını başlatmıştır. Limitler içine dönüş ise hata düzeltme zamanını tamamlandığını belirlemiştir. Bu şekilde üretilen veriler ile İlk-hata-zamanı, Hatalar-arası-süre, İlk-hata-düzeltilme-zamanı, Hata-düzeltilme-süresi gibi degiskenleri belirleyen olasılık yoğunluk fonksiyonunun saptanması sağlanabilir. 60 aday düşük ve ileri öğrenme düzeyinde olarak adlandırılan iki teste tabi tutulmuştur. Bu iki testten amac, tanımlayan fonsiyon olarak tek yoğunluğun yeterliliğini ve yoğunluk fonksiyonunun parametrik değerlerinin varyasyonlarını belirlemek olup ilave olarak, hazard fonksiyonundaki değişimlerden, kişilerin öğrenme kapasiteleri ile ilgili değerleri araştırılmıştır.

$T = \{t_1 \setminus i=1,2,\dots,N\}$ veri seti istatistiğinde,

$Nc(t)$: t zamanından sonra tamamlanan düzeltmelerin toplamı,

$Nc'(t)$: t'den sonra tamamlanamayan düzeltmelerin toplamı ise ve düzeltilme fonksiyonunun dağılımını $Ch(t)$ şeklinde ifade edersek, düzeltilememe fonksiyonunun zamana göre değişim oranı şu şekilde yazılabilir.

$$\frac{dCh'(t)}{dt} = -\frac{1}{N} \frac{dNc(t)}{dt} \quad \text{veya} \quad \frac{N}{Nc'(t)} \frac{dCh'(t)}{dt} = -\frac{1}{Nc'(t)} \frac{dNc(t)}{dt}$$

eşitliğin sağ tarafı basit olarak düzeltme oranı $C(t)$ olarak ifade edildiğinde yukarıdaki eşitlik

⁷ Thaddeus L.Regulinski T.L., op.cit., s.411

$$\frac{1}{Ch'(t)} \frac{dCh'(t)}{dt} = -c(t) \text{ şekline dönüştürülebilir.}$$

Verilen ilk şartlara bağlı olarak yukarıdaki diferansiyel denklem çözülürse

$$Ch'(t) = e^{-\int_0^t c(t)dt} \text{ ve } Ch'(t) + Ch(t) = 1 \text{ olduğu için:}$$

$$Ch(t) = 1 - e^{-\int_0^t c(t)dt}$$

Yukarıdaki ifade tamamiyle genel bir ifade olup sabit ve ani düzeltme oranlarını içermekte, yani düzeltme oranı $C(t)$ zamana göre değişken olabilir veya olmayabilir. Aynı ifadeyi şu şekilde de yazmak mümkündür:

$$Ch(t) = \int_0^t p(t)dt \text{ bu ifade düzeltme fonksiyonunun düzeltme zamanlarının}$$

rastgele değişkenini belirleyen $p(t)$ olasılık yoğunluk fonksiyonu şeklinde ifade edilmiş şeklidir.

11. Deneysel Doğrulama ve Analitik Teknik:

Yukarıda açıklanan ve AF Human Resource Laboratory Wright-Patterson, OHIO'da uygulanan test sonundaki analitik incelemede üretilen verilerden matematiksel bir fonksiyonun modellenmesi için öncelikle verilerin kararlı veya stokastik olup olmadığının tesbiti gerekmektedir. Eğer verilerin doğrusal, kararlı olduğu düşünüldüğünde açık olarak matematiksel bir ilişki ile ifadesi mümkündür. Eğer verilerin rastgeleliği belirlenir ise karmaşık durum mevcuttur. Rastgelelik hipotezinin kabulünün ardından Kolmogorov-Smirnov testi ile verilen örnek kitlenin belirli yoğunluk fonksiyonuna sahip ana kitleden gelip gelmediği test edilmiştir.

Yapılan testler sonunda, genel olarak gerek **dikkat**, **gözleme** gerekse yukarıda blok şeması görülen **Düzeltilici-İzleme** görevlerde insan açısından:

İlk-Hata-Zamanı, **İlk-Arıza-Düzeltilme-Zamanı** değişkenlerine **Weibull** yoğunluğunun hakim olduğu, diğer yandan **Lognormal** yoğunluğun **Arızalar-Arası-**

Zaman ve Arıza-Düzeltilme-Zamanı rastgele değişkenlerine hakim olduğu kanaatine varılmıştır.

Düzeltilme(telafi) insan etkenlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$Ch(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{Int-\mu}{\sigma} \right\}^2} dt$$

$\mu = Int$ lerin ortalaması.

$\sigma = Int$ lerin standart sapması

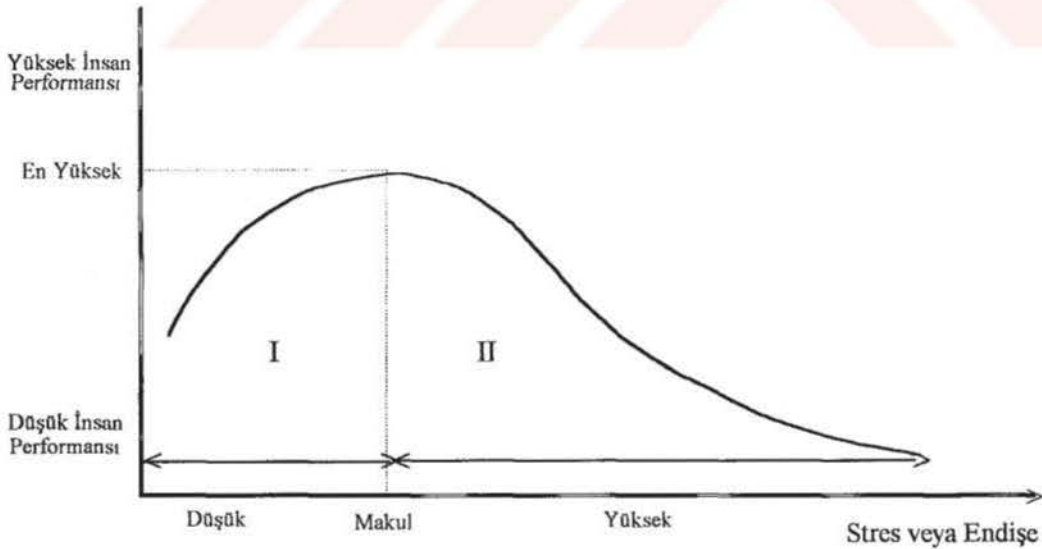
Böylece herhangi bir t değeri için standart sapma ve ortalama bilindiğinde, $z=(Int-\mu)/\sigma$ değişimini ve standart normal eğri alanları tablolarını kullanarak yukarıdaki formülün çözümlenmesi mümkündür. Gözleme ve izleme türü görevler sonunda üretilen verilerin; kontrol sistemleri cevap süreleri, hedef belirleme, araç dengeleme, uçuş rotasının paterninin minimum klerans ile korunması gibi faktörlerin belirlenmesi amacıyla kullanılabilir. Zaman sürekli sahalarda modellemeye dayalı bu gibi veya diğer ilgili uygulamalar için, görev performansı güvenilirliği veya düzeltilirliği insan etkenliğinin modellenmesinde faydalı fonksiyonlar olduğu tartışılmaz gerçektir.

6.İNSAN STRES-PERFORMANS ETKİLEŞİMİ

Stres, insan performansı ve güvenilirliğini etkileyen önemli nedenlerden biri olup, aşırı stres altındaki kişinin hata yapma olasılığının daha yüksek olduğu açıktır. Çeşitli araştırmacılara göre insan performansı etkinliği ve stres veya endişe arasındaki ilişki Şekil.6.1. de görüldüğü gibi tarif edilebilir¹. Belirli bir görevde insan hata oranı, maruz kaldığı gerilime bağlı olarak düzgün eğrisel bir değişim göstermektedir. Şekildeki eğriden stresin tamamıyla negatif yönde olmadığı, aslında, normal düzeydeki stresin insan etkinliğini optimal düzeye getirmede faydalı bir etken olduğunu göstermektedir.

- Çok düşük stresde, görev sıkıcı ve cazibesi düşük olup çoğu operatör etkin olarak çalışmadığından verimlilik optimal düzeyde değildir. Pasif tip gözlem görevleri genellikle bu tip olup 0.5 ve daha fazla hata oranını içerir. Ortalama 10^{-1} hata oranı az pasif kontrol görevleri olarak belirlenmiştir²]

- Stres normal düzeyde ise çalışmada optimum düzeyde olur ve normal düzey operatörü tetikte tutmak için yeterli stres olarak yorumlanabilir. Stres arttıkça insan performansı düşmektedir. Bu düşüş ana olarak korku, üzüntü veya benzeri psikolojik nedenlerden kaynaklanmaktadır. şekilde de görüldüğü gibi stres maksimum düzeyde ise, insan güvenilirliği en düşük düzeydedir.



Şekil 8.1. Stres, Endişe - İnsan performansı

¹ Dhillon B.S., Human Reliability with human factors. ss.28-29. (New York: Pergamon Press, 1986), ss.28-29

² E.W.Hagen, "Control and Instrumentation". Human Safety. C.17. s.316. 1976

Eğri; I ve II olmak üzere iki bölgeye ayrılmıştır. Bölge I'de insan etkinliği stres arttıkça artar, bölge II'de ise etkinlik stres artar iken azalır. Şekilden, işletmenin yüksek stres altında çalışırken, insan hatasının ortaya çıkma olasılığının normal düzeyde stres altındaki çalışmaya nazaran daha yüksek olduğu gözlenebilir.

6.1.MESLEKİ STRESİN NEDENLERİ

Mesleki stresin nedenlerini dört ayrı grupta toplamak mümkündür

Tip I: Aşırı veya gereğinden az iş yükü nedeniyle ortaya çıkar. Aşırı iş yükü halinde işin gerektirdiği fiziki ve zihinsel aktiviteler bireyin yetenek ve gücünün üzerindedir. Benzer şekilde az iş yükü ise kişiye yeterli güdüleme sağlayamaz. Az iş yüküne; zihinsel girdi eksikliği, tecrübe ve maharet kullanım fırsatı verilmemesi, yeknesak-tekrarlanan performans örnek olarak gösterilebilir.

Tip II: Mesleki değişikliklerle alakalıdır. Değişiklik bireyin davranışsal, fizyolojik ve zihinsel fonksiyonlarının paternlerini etkiler. Bu tip stres verimlilik ve büyümeyle ilgilenen organizasyonlarda mevcut olup örgütsel yapılanma, ilerleme ve bilimsel gelişmeler ve yeniden yerleşim bu tip değişikliklere örnek olabilir.

Tip III: Mesleki kısıtlama ve yasaklamalarla ilgilidir. İşin amaca ulaşmayı engellediği durumlarda ortaya çıkar. İletişim eksikliği, hedeflerde müphemlik, bürokrasi zorlukları ve yetersiz mesleki gelişim rehberliği örnek olarak gösterilebilir.

Tip IV: Yukarıda belirtilen üç tipten ayrı olarak diğer olası mesleki stres nedenlerini kapsar. Örneğin; gürültü, aşırı veya yetersiz aydınlatma, kisiler arası zayıf ilişkiler gibi faktörler bu tip stersin nedeni olabilir.

6.2.İNSAN ÜZERİNDEKİ STRESİN ÖZELLİKLERİ:

Çalışan kişi özel bir görevi yerine getirirken çalışma performansını etkileyen çeşitli limitler mevcuttur. Bu limitler aşıldığında hataların ortaya çıkma olasılıkları da artar. Bu olasılıkların enaza indirilmesi için çalışan kişinin limit ve karakteristiklerinin dizayn safhasında dizayn veya güvenilirlik mühendislerince göz önüne alınması gerekir. Çalışan kişiye özgü bazı stres karakteristiklerinin aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür.³

- Çalışanın hareketlerinin doğruluğunun tesbiti için gerekli olan geri besleme yetersiz
- Kişiden iki veya daha fazla ekranın süratli olarak mukayesesinin istenmesi
- Çalışanın karar verme zamanı kısa
- Çalışan tarafından yapılacak gözlem ve kontrole dayalı faaliyet süresi uzun
- Görevin yerine getirilmesinde takip edilen iş veya işlem sırası çok uzun
- Ayırt edilecek birden fazla sıkıcı görüntü
- Birden fazla kontrolün aynı anda ve hızlı olarak yapılması zorunluluğu
- İş/İşlem basamaklarının süratle yerine getirilme gereksinimi
- Kararların, çeşitli kaynaklardan toplanan verilere dayalı olarak verilme zorunluluğu

6.3.STRESİN BİREY ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Çeşitli araştırmacılara göre stres bireyin vücudu üzerine başağrısı, sırt ağrısı, tansiyon yükselmesi, boğazda yanma, ülser, iştah azalması, adele gerilmesi, koronel kalp hastalığı, göğüste yanma ve kalp atışlarında fazlalaşma şeklinde sıralanabilir. İlave olarak çarpıntı, bahar nezlesi, yorgunluk ve uyuşukluk, direnç düşüklüğü de stres ile alakalıdır.

³ D.Meister, "Human factors in reliability", Reliability Hand Book, (New York:1966), ss. 12/17-37

6.4.STRES KONTROL FAKTÖRLERİ

Aslında, kişinin yaşamında her an karşılaşılabileceği gerçek problemler olup kişi üzerinde stresi arttırıcı role sahip faktörlerden bazıları:

- Kestirilemeyen mizaca sahip kişiler ile bir arada çalışmak zorunda olmak,
- Halihazır işten mutlu olmamak,
- Ciddi mali sıkıntılar,
- Eş, çocuk veya her ikisiyle ilgili sorunlara sahip olmak,
- İşten çıkarılma olasılığı
- Terfi olasılığının düşük olması,
- Tecrübe, yetenek ve bilgi yetersizliği
- Zayıf bünye,
- Aşırı sıkı zamana uyma zorunluluğu altında çalışma,
- Zamanında yetiştirebilmek için çoğu kez eve iş götürme,
- Amirler tarafından aşırı iş yüklemesi
- Tecrübe ve yeteneklerinin altında işe sahip olma

7.ÇALIŞMA ORTAMI-İNSAN PERFORMANSI ETKİLEŞİMİ

Yıllardan beri cihazların laboratuvarlar çalışmalarında elde edilen veya teorik olarak öngörülen idame edilebilirlik değerleri ile uygulamadaki değerler arasında fark olduğu gözlenmektedir. Uygulamalardaki arızaya kadar ortalama zaman (AKOZ) değerleri ile laboratuvar sonuçları veya öngörülen AKOZ değerlerinden düşük olduğu durumlarda bakım ve idame politikalarının gözden geçirilmeleri gerekmektedir. Bu farklılığın nedenleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Demostrasyon teslerinde arızalar genellikle bakım personeline kolaylıkla teşhis edilebilecek şekilde seçilir.
- Arıza simülasyonunu dizayn edecek personelin testi gerçekleştirecek personel ile önceden gerekli iletişimi kurma olanağı vardır
- Testi gerçekleştirecek olan bakım personelinin ehliyet düzeyi normalden fazla olup üstelik cihazın ortaya çıkışından test aşamasında kadar tüm faaliyetin içinde ve arıza modlarına aşinadırlar.
- Cihazın simule edilen arızaları cihazı tamamiyle karakterize etmeyebilirler.
- Arıza takip veya önleyici yönde çalışan personelin kullanacağı materyallerin yanlış veya yetersizliği

Yukarıda belirtilen faktörlerin tamamı veya bir kısmının probleme katkısı olabileceğinin yanında çalışma ortamı verileri ve tecrübeler laboratuvar ile atölye arasındaki çalışma ortamının stres farklılığı da atölye tamir süresinin artışı yönünde katkısı olduğunu göstermektedir. Çalışma ortamının etkisini çeşitli şekillerde ele almak mümkündür.

7.1.VARDİYA USULÜ ÇALIŞMA

Değişik görevlere ilişkin performans, günün saatlerine bağlı olarak dalgalanmalar göstermekte olup bu dalgalanmaların boyut ve yönü görevden göreve değişmektedir. Örneği tamire yönelik faaliyetlerde de insan performansını etkileyen belli başlı faktörler mevcut olup bunlar özetle:

- Günün saati
- Vardiya başlangıcından itibaren geçen süre
- Testten önce fiziki çalışmanın yapılıp yapılmadığı şeklinde özetlenebilir.

Bir seri yüksek ehliyet seviyesini gerektiren el yordamı ile yapılan faaliyetlere ilişkin sabah, öğle ve akşam vardiyalarında yapılan ölçümler sonunda: ¹

- Endüyük ortalama performans düzeyinin akşam en yüksekinin ise sabah vardiyalarında,
- Vardiya başındaki ve sonudaki performans arasında öğrenmeye dayalı, istatistiksel olarak anlamlı farklılığın olduğu gözlenmiştir.

Fiziksel performansın yanında görsel veya duyuşsal uyarıcılara reaksiyon zamanı, hesaplama, duyma, hatırlama gibi zihinsel faaliyetlere ilişkin yapılan testler sonunda:

- Test başlangıcından sonuna doğru performansta bozulmalar,
- Fiziksel aktiviteden sonraki performansta düşüş
- Gündüz ve sabah performans yüksekliği tesbit edilmiştir.

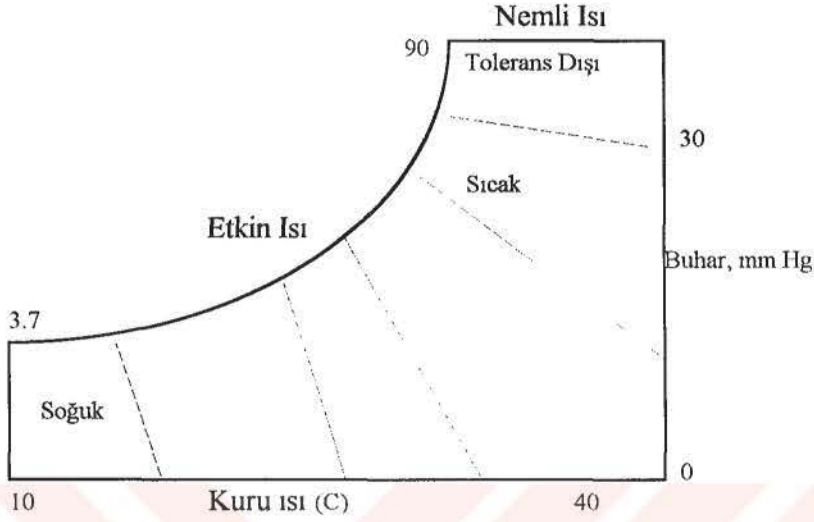
Sonuç olarak fiziksel çabaların zihinsel performansı etkilediği, hatta gündüz vardiyasında olursa dahi sıkıcı, yeknasak olmasının da performans üzerinde olumsuz etki yaptığı, uyku ve yaklaşık 24 saatlik döngüler ile oluşan biolojik aktivite ve fonksiyonların gece vardiyalarında performansın saat ilerledikçe düşmesine neden olduğu tesbit edilmiştir.

7.2.ISI ve PERFORMANS

İnsan üzerindeki ısının etkisi; vücut ısısı, kalp atışı ve terleme fizyolojik değişkenleri ile gözlenebilir. Çalışma ortamında ısı değişimini etkileyen birçok çevresel faktör olup bu faktörlerden biri veya kombinasyonları sonucu oluşan strese ilişkin iki indeks geliştirilmiştir.

¹ Sontz C. ve Louis M.N., "Environmental Influence on Field MTTR" *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, (Orlanda:1983), s.172

Önce, ısı ve nemin etkisi tek değer olarak birleştirilip hava akışı göz önüne alınarak Etkin Isı indeksi belirlenmiştir. Daha sonra bu indeks soğuk ve sıcak ortamda nemin etkisinin farklı olduğu göz önüne alınarak geliştirilmiştir.



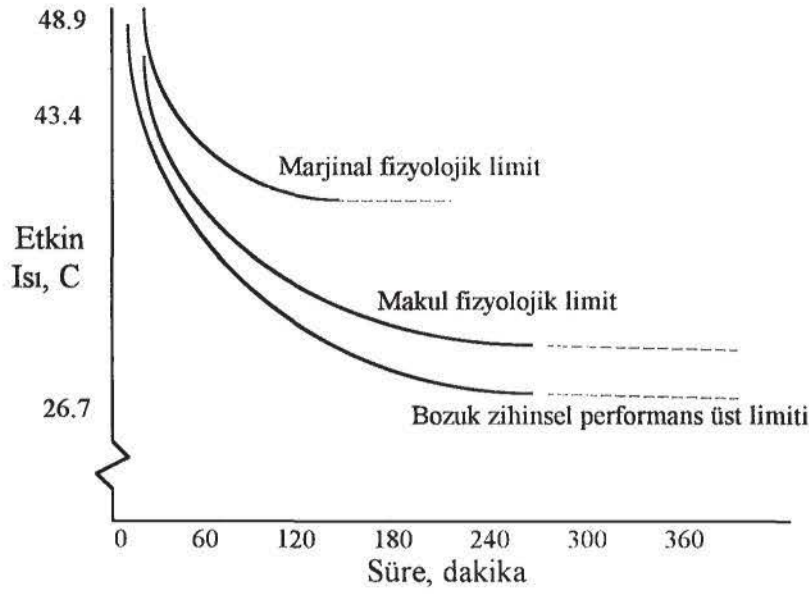
Şekil.7.1-Basitleştirilmiş Etkin Isı Skalası

Etkin ısı indeksinden yararlanılarak insan performansı değerlerinin eldesinde kullanılmak üzere, Oxford indeksi geliştirilmiştir.

$$Index = 0.85 \text{ Kuru ısı} + 0.15 \text{ Nemli Isı}$$

Isı ve nemin bakım görevi performansı üzerindeki etkisini belirlemek üzere yapılan çalışmalar sonunda performansta istatistiksel olarak anlamlı düşmelere sebep olabilecek en düşük ısı, tolerans değerleri, zihinsel ve fiziksel faaliyetler için limitler aşağıdaki Şekil.7.2'de görüldüğü gibi belirlenmiştir. Genellikle kritik bölge olarak ortama alışık ve uygun giyinmiş kişinin etkin çalışmayacağı sıcaklıklar olarak 28.3 ve 31.0 derece kabul edilmiştir.

Yapılan araştırmalar gerek zihinsel gerekse görsel performansın soğuk ortamdaki fazla etkilenmediğini göstermektedir. Manuel yapılan faaliyetlerde soğuk ortamın performans üzerindeki etkisi el-derisi-sıcaklığının önemli bir faktördür. Kritik bölge olarak 12 ve 13°F olup soğuk ortam bilhassa parmak becerilerine dayalı faaliyetlerde etkin olmaktadır.



Şekil 7.2- Etkin ısı, ısıya maruz kalma süresi ve performans ilişkisi

7.3. TİTREŞİM ve İNSAN PERFORMANSI

Titreşimin insan vücudu üzerindeki fiziki etkisinde; insan vücudunun duruşu ve vücut ile titreşim kaynağı arasındaki maddeler gibi çeşitli faktörler rol oynar. İnsanın titreşime olan tepkisini dolayısıyla insan performansını etkileyen faktörler:²

- Titreşimden dolayı insanın görme performansındaki bozulma titreşimin genliği ile ilgili olup 10 ile 25 Hz arasındaki frekanslarda daha büyüktür.
- İnsanın izlemeye gücündeki bozulmalar titreşimin genliği ile orantılı olup çok düşük frekanslarda, örneğin 5 Hz, enyüksek değerdedir.
- Denge ve kasa dayalı kontrolün hassasiyeti titreşimden dolayı bozulma gösterebilir.
- Reaksiyon zamanı, kontrol ve patern tanıma gibi görevler titreşime karşı yüksek dirence sahiptir.

² Mackworth, Researches on the measurement of human performance, Medical Research Council, Special Report Series no. 258'den aktaran Sontz C., ibid., s.173

7.4.DENEYİMSEL GENEL İLİŞKİLER³

Çevresel stres ile insan performansı arasındaki ilişkiler yaklaşık olarak göz önüne alınmalı ve eğilim ile bağlı düzeyleri göstermesi açısından değerlendirilmelidirler.

i. Çalışma Sürati-Vardiya

İnsan vücudunun ritmik fonksiyonlarındaki düzensizlikler nedeniyle geç vardiyalardaki çalışma hızındaki düşme:

$$K(S) = 0.939e^{.052S}$$

S = 1 (Sabah vardiyası)

S = 2 (Öğleden sonraki vardiya)

S = 3 (Gece vardiyası)

S = 1 için K(S)'in değeri yaklaşık olarak 1.0.

Yukarıdaki eşitlik sabah vardiyasında 1.0 saat gerektiren işin gece vardiyasında 1.04 saat gerektirdiğini ifade etmekte olup hernekadar fark çok düşükse de diğer faktörler ile bir araya getirildiğinde artabilir.

ii. Çalışma Sürati-Vardiya İçi

Her vardiya içinde gerek yorulmaya gerekse psikolojik faktörlerden dolayı vardiya içi çalışma süratinde zaman geçtikçe bir azalma olduğu bilinmektedir.

iii. Güdülemenin Etkisi:

K(I) = 1 yüksek güdüleme

K(I) = 2 1.59 düşük güdüleme (Örneğin amirin gözlemediği zaman yapılan normal tamir işlemi).

iv. Ehliyet Düzeylerinin Etkisi:

Çalışma Sürati (ehliyetli) = 2.5 x Çalışma Sürati (Vasat)

veya

K(ehliyet) = 1 (vasat), K(ehliyet) = 2.5 (ehliyetli)

v. Titreşim:

İnsan performansı üzerinde tartışılmaz etkiye sahip titreşim ile performans arasındaki etkileşimin basit eşitlikler ile ifadesi mümkün değildir. Bu nedenle yapılan grafik çalışmalarında hız, kat edilen mesafe ve titreşim frekansı gibi değerlere bağlı olarak çeşitli

³ Sontz C. ve Louis M.N., op.cit., ss. 175-177

bölgeler belirlenip işin özelliğine bağlı olarak ortalama tolerans limiti elde edilir. Bu bölgeleri aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

- Makul
- Çok Yüksek, 1 dakika için makul olabilir
- Yüksek, 10 dakika için olabilir
- Az yüksek, bir saat olabilir
- Kolayca fark edilip tahammül edilebilir
- Algılanabilir, kolaylıkla tahammül edilir
- Algılanamaz

Eğer bir görevin yerine getirilme olasılığı, $Pe(v)$, görevin başlamasına kadar titreşime maruz kalınan süre, tamir süresi, ortalama titreşim tolerans limiti gibi değerler ile ifade edilir ise titreşime dayalı gerilimin bulunduğu bir ortamda tekrarlanabilecek ortalama tamir görevinin miktarı:

$$K(v) = \frac{1}{1 - Pe(v)} \text{ formülü ile hesaplanabilir.}$$

Yukarıda açıklanan faktörler göz önüne alınarak laboratuvar veya atelye TKOZ' değerini öngörülen TKOZ değerinin fonksiyonu olarak aşağıdaki formül ile hesaplamak mümkündür.

$$TKOZ' = \frac{TKOZ \cdot K(S) \cdot K(I) \cdot K(V)}{K(ehliyet) \cdot K(ısı)}$$

Bu formül yardımıyla başlangıç şartları verilen mekanik bir sistemin fabrika bakım süresinin beklenen değeri veya gerçek uygulamalarda ortaya çıkabilecek belirli stres şartları altındaki beklenen TKOZ değerlerinin hesaplanması mümkündür. Örneğin:

AKOZ(öngörülen) = 1 Saat

Ehliye düzeri = Vasat

Vardiya = 3

Etkin Isı = 95°F

Güdüleme = Düşük

Titreşim = Yüksek

$K(V) = 45$ dakika ise bunlara bağlı olarak K faktörleri:

$K(s) = 1.1$, $K(I) = 1.59$, $K(Ehliyet) = 1.0$, $K(ısı) = 0.59$, $Pe(v) = 0.761$, $K(v) = 4.19$ ise beklenen AKOZ, 12.42 saat olarak hesaplanır. Bu durum öngörülen değerler ile gerçek uygulamadaki değerler arasındaki farkı vurgulaması açısından önemlidir.

8.İNSAN HATALARI

Sistemin: dizayn, üretim ve işletim safhalarında ortaya çıkabilecek arızalardaki insan hatalarının rolü sistemden sisteme değişebileceği gibi aynı sistemin çeşitli safhalarında da değişebilir. *Cihaz, makina ve teçhizat üzerinde hasarla veya programlanmış işletim faaliyetlerde aksamalara sebebiyet verecek tanımlanmış bir görevin yerine getirilmesindeki başarısızlık veya yasaklanmış bir hareketin yapılması* şeklinde tanımlanabilecek insan hatasının ortaya çıkma olasılığının tüm sistem güvenilirliğini etkilemesi nedeniyle ortaya çıkış nedenlerinin sistemin her aşamasında incelenmesi gerekmektedir.

8.1.İNSAN HATALARININ ORTAYA ÇIKIŞI

Değişik hallerde ortaya çıkan insan hatalarının oluşumuna sebep teskil edecek çeşitli nedenler olmasına rağmen, çoğu insan hataları insanın birçok şeyi farklı şekilde yapabileme yeteneğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Çalışan kişinin davranışının anlaşılması üç parametre ile izah edilebilir:¹

- Uyarıcı girdi (U)
- İç Tepki (I)
- Dış Tepki (D)

Uyarıcı girdi, çalışan tarafından değişiklik olarak algılanan çevredeki herhangi fiziksel değişimdir. Göstergenin yanıp sönmesi, radar beneğinin belirmesi, çalışan makinenin durması, fabrika düdüğü gibi şeylerin hepsi birer uyarıcıdır.

İç tepki, çalışanın uyarıcıyı algılaması ve onunla bütünleşmesidir.

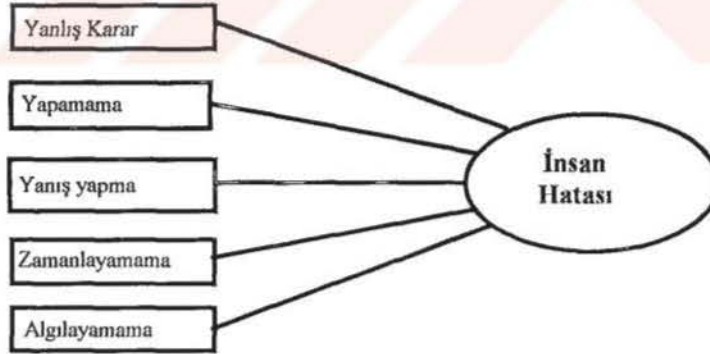
Dış tepki ise çalışanın iç tepkiye fiziksel reaksiyonu ve uyarıcıya gösterdiği davranıştır. Konuşma, yazma, topu tutma, anahtarı kapama buna örnek olarak gösterilebilir. Tüm davranışlar bu üç elemanın (U-I-D) kombinasyonu şeklindedir. Karmaşık davranışlar arabağlantılı birbirini takip eden U-I-D zincirini içerir. U-I-D zincirindeki her eleman bir

¹ David Meister, "Human Factors in Reliability", *Reliability Handbook*, Der.W.G.Ireson, (New York, McGraw Hill, 1966), s. 12(4)

öncekinin başarı performansına bağlı olup, insan hatası aşağıda belirtildiği nedenlere dayalı olarak zincirdeki herhangi elemanın kırılmasıyla ortaya çıkar.

- Çevredeki fiziksel bir değişimin U olarak algılanmaması;
- Değişik uyarıcıların operatör tarafından ayırt edilememesi neticesi hayati öneme haiz durumun ehemniyetini kavramada yetersizlik
- Uyarıcının algılanması fakat anlamının yanlış anlaşılması neticesinde alınan kararın yanlış olması ve yanlış hedefe yönelim
- Operatörün bilgi yetersizliği neticesi uyarıcının doğru anlaşılması fakat doğru cevabın bilinmemesi
- Uyarıcıya cevap teşkil edecek D'nin bilinmesi fakat operatörün fiziksel kapasitesinin üzerinde olması neticesi lüzumlu fonksiyonu yerine getirmede başarısızlık
- D'nin operatörün kapasitesinin dahilinde olması fakat doğru ve zamanında oluşturulamaması neticesi beklenmedik olaylar karşısında zamanlama hatası veya gerekli olduğu anda davranmada gecikme

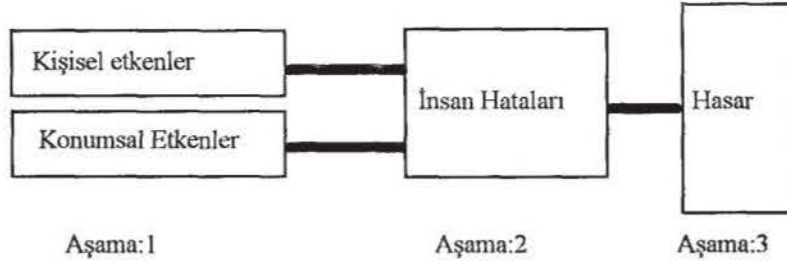
durumunda aşağıdaki şekilde özetlenmeye çalışıldığı gibi insan hatası ortaya çıkar.



Şekil 8.1-İnsan Hatasını Oluşumu

Sonuçta hedefe kişinin hatalı veya yetersiz karar veya davranışı nedeniyle erişilememesi hallerinde insan hatası oluşmaktadır diyebiliriz. İnsan hataları aşağıdaki şekilde de gösterildiği gibi üç seviyeye bölünebilir.²

² B.S Dhillon., Chanan Singh, *Engineering Reliability*, (New York:Jhon Waley and Sons), 1981, s.163

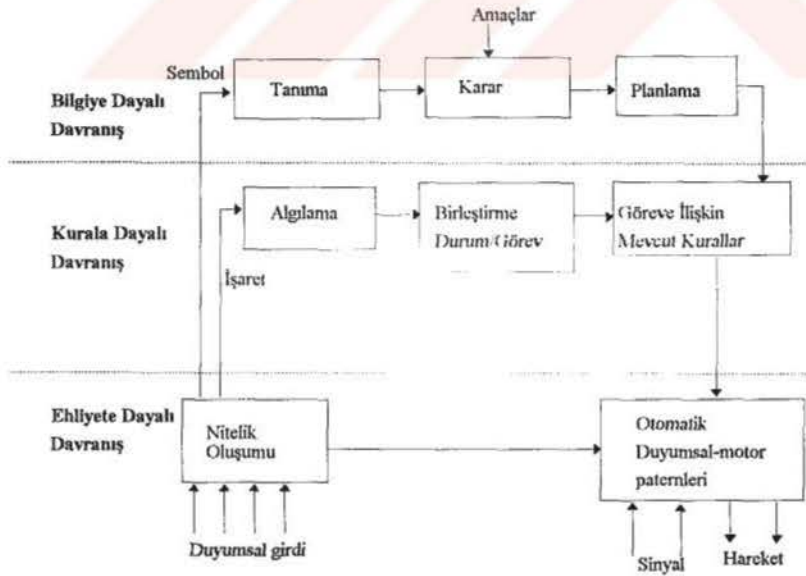


Şekil 8.2-İnsan hatalarının oluşum aşamaları

İnsan hatasının ortaya çıkma durumuna her üç aşamada da müdahale mümkündür. Örneğin, gelecekteki insan hatalarının birinci aşamda önüne geçme yönünde gayretler olabileceği gibi insan hatasından kaynaklanan hatalı durumun ikinci aşamada düzeltilmesiyle muhtemel olaylardan sakınılabılır. Üçüncü aşamada ise edinilen tecrübe ve geri besleme ile kişi aynı durumum tekrar ortaya çıkmasına mani olabilir.

8.2. ZİHİNSEL KONTROL VE İNSAN HATA MEKANİZMASI

İnsan davranışının kontrolüne ilişkin hiyerarşik kontrol yapısını gösteren Şekil 8.3'de sistem mühendisliği açısından dinamik bir ortam ile insan etkileşimindeki uyumsuzluklar incelenebilir.³ Doğal olarak model ehliyet seviyelerin farklı düzeylerinin psikolojik tanımlaması ile uyumlu gözükabilir.



Şekil 8.3-Tipik insan hata mekanizması ve davranış kontrolü ile ilişkisi

³ Jens Rasmussen, Keith Duncan, Jaques Leplat, New Technology and Human Error, (Suffolk:John Waley & Sons, 1988), s.53

Model üzerinde; ehliyet, kural, bilgiye dayalı davranış olarak sınıflandırılabilir duyuşsal kontrol düzeyleri ayırt edilip hiyerarşik yapıda gösterilmiştir.

Ehliyete-dayalı davranış; düz, otomatize edilmiş ve yüksek derecede entegre edilmiş davranış paterni gibi bilinli kontrol olmadan oluşan niyetlenme ile yapılan, bir aktivite veya hareketteki duyuşsal-motor performansını göstermektedir.

İkinci seviye olan kurala dayalı davranışta, iş istasyonu ile ilgili her türlü yordam, önceki iş tecrübelerinden, diğer personelden veya problemin anında çözümünü ve planlama sonunda elde edilebilecek, saklı kurallar veya prosedürlerle kontrol edilir.

Aşına olunmayan durumlarda performansın kontrolünü, daha yüksek kavramsal düzeye çıkar. Burada performans amaç kontrollü ve bilgiye dayalıdır. Amaç, ortamın analizine ve kişinin maksadına dayalı olarak açıkça formüle edilir.

TABLO I

Performans düzeyi ve hata faktörleri

PERFORMANS DÜZEYİ	HATA FAKTÖRLERİ
I EHLİYETE DAYALI	1.Önceki kullanım sıklığı ve yakınlığı 2.Çevresel kontrol sinyalleri 3.Müşterek tasarı özelliği 4.Ani tasarım
II KURALA DAYALI	1.Hafıza 2.Varoluş 3.Uyumlu eğilimler 4. Aşırı basitleştirme 5. Aşırı güven
III BİLGİYE DAYALI	1.Seçimlilik 2.Zihinsel yük fazlalığı 3.Görülmeenin düşünülmemesi 4.İhmal 5.Benzetebilme 6.Uyumlu eğilimlerin tetkiki 2.Eksik/Yanlız zihinsel model

Performansın üç ayrı düzeyindeki hatalar psikolojik ve durumsal faktörlerin özelliklerine bağlı olarak ayırt edilirler. Bu farklılıkların ayırt ediciliği, hatalara şekil veren faktörlerin çoğu birden fazla düzeyde ortaya çıktığı için, fazla değildir. Diğer bir deyişle ehliyete dayalı davranış düzeyinde ortaya çıkan hataları şekillendiren faktörler kurula dayalı düzeyde etkili olabileceği gibi bunlardan çoğu bilgiye dayalı düzeydeki işlemlere tesir edebilir. Her düzeydeki ana faktörleri aşağıdaki tabloda özetlemektedir.⁴

8.3.İNSAN HATA FAKTÖRLERİ VE SONUÇLARI

İnsan hatasının oluşmasına sebep teşkil edebilecek belirgin bazı nedenleri çok kısa olarak şu şekilde sıralamak mümkündür:

8.3.1.Eğitim ve ehliyet:

- peratör veya bakım elemanlarının önceden tanımlanan görevi yerine getirecek düzeyde, yeterince teçhiz edilmemesi
- Operatör veya bakım elemanlarının performanslarının optimum düzeyde olmasını etkileyecek olan motivasyonun zayıf olması

8.3.1.Çalışma ortamı

- Yetersiz ışıklandırma
- Uygun olmayan sıcaklık
- Aşırı kalabalık
- Uygun olamayan rutubet
- Yüksek gürültü seviyesi
- Erişim zolukları
- Zayıf iletişim
- Zayıf yönetim
- İşin karmaşıklığı

8.3.2.Alet ve edevat

- Alet ve edevatın hatalı kullanımı
- Alet ve edevatın yetersiz kullanımı
- Yetersiz malzeme ve teçhizat
- Yetersiz materyal, teçhizat bakım ve kullanım usulleri

⁴ Jens Rasmussen, Keith Duncan, Jaques Leplat. op.cit.. s.73

İnsan hatalarının sonuçları makina ve teçhizata göre değişebileceği gibi faaliyete göre de değişebilir. Bazen sistem performansında gerileme gibi düşük düzeyde olabileceği gibi can kaybına sebebiyet gibi büyük düzeyde de olabilir. Genel olarak insan hatasının makina ve teçhizat üzerindeki etkilerini

I.Makina ve teçhizatın faaliyetinin durması

II.Makina ve teçhizatın faaliyetinde önemli veya önemsiz gecikmeler şeklinde sınıflandırılabilir.

8.4.İNSAN HATA SAHALARI, TİP VE NEDENLERİ

İnsan hatalarını nedenleri ve sonuçları itibariyle çeşitli kategorilerde ele almak mümkündür.

En genel anlamda insan hataları :⁵

1.**Dizayn** : Sistemlerin dizayn aşamasındaki yetersizlikler ve yetersiz çalışma sonunda ortaya çıkan etkin ve yeterli olamayan dizyandan kaynaklanan hatalardır.Örneğin kontrol elemanları ve göstergelerin birbirinden çok uzakta olması sonucu çalışanın her ikisini etkin şekilde kullanmakta zorlanmasına neden olur. Bu aşamada yapılan hataları

- İnsan gereksinimlerinin yorumlanmasında yapılan hatalar
- Kişiye uygun olmayan fonksiyonun tahsis edilmesi
- İnsan-Makina bileşenlerinin etkileşiminin etkinliğini değerlendirememesi şeklinde sınıflandırılabilir.

Dizayn çalışmalarında acelecilik, tasarımcının belirli bir çözüme eğilimi, sistem ihtiyaçlarının yetersiz analizi bu hataların oluşmasına sebep teşkil edebilecek faktörler olup, dizayn aşamasında insan hatalarının ortaya çıkış olasılıklarının azaltılması amacıyla göz önüne alınması gereken faktörler aşağıda belirtildiği gibi özetlenebilir. ⁶

- **Fonksiyonların Tahsisi:** Teçhizat ve insan arasında fonksiyonların tahsisi
- **Aşırı Otomasyon:** El yordamı faaliyetlerde önemli bir performans kaybı ve tehlike olmadıkça otomasyona gidilmemesi
- **Çalışanın Görevleri:** İnsan tarafından yürütülecek

⁵ B.S.Dhillon, *H.Reliability with human factor*. (New York:Pergamon Press, 1986), ss.46-48,

⁶ David Meister, op.cit., s.12(10)

- **İnsan Stres Karakteristikleri:** Aktivitelerin insanda strese neden olma durumları
- **Alet-Teçhizat Verileri:** Alet ve teçhizatın geribesleme, koruyucu bakım, arıza uyarıcıları
- **Erişilebilirlik:** Arıza veya bakım anında kolaylıkla erişebilme

gibi faktörler göz önüne alınmalıdır.

2.İşletim Hatası : %20'de %50'ye kadar makina ve teçhizat arızalarının insanda kaynaklandığı, %50'den %80'e kadar insandan kaynaklanan arızaların ise üretim ve teçhiz işleminde zayıf işçilikten kaynaklandığı⁷ düşünüldüğünde işletim anındaki insan faktörünün güvenilirlik açısından önemi ortaya çıkar. İşletim hatalarına sebep teşkil edebilecek bazı faktörler ve hatanın ortaya çıkış şekilleri:⁸]

- Uygun yordamların olmaması
- Görev karmaşıklığı ve aşırı yük
- Personel seçimi ve eğitim noksanlığı
- Çalışma ortamındaki uygunsuzluklar
- Çalışanın dikkatsizliği ve ilgisizliği sonucu :
 - Gerekli görevin veya adımın yerine getirilememesi
 - Gerekli görevin veya adımın yanlış yerine getirilmesi
 - Görev veya adımın sıraya uygun olarak yerine getirilememesi
 - Gereksiz görev veya adımın icrası şeklinde oluşur.

Bireysel olarak operatör hatalarının, ortalamasının sabit ve standart dağılımının değişken hata olarak belirlendiği Gaussian dağılımına yaklaştığı gözlenmiştir. Toplam sistem hatasına ilişkin hesaplamada kullanılan formül:

$$\sigma_{1+2}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$$

σ_{1+2} : Sistemin toplam hatası

σ_1 : İlk kaynağın hatası

σ_2 :İkinci kaynağın hatası

⁷ David Meister, ibid., s.12(23)

⁸ B.S., Dhillon op.cit., s.44

İşletim hatalarını oluşum ve sonuçları itibariyle sınıflandırmak mümkündür:⁹

Fonksiyonla ilgili hatalar: Bir işletmen karar verme, sıralama, problem çözme, tahmin, izleme, ortaya çıkarma, tanımlama, algılama, sınıflandırma ve kodlama gibi çeşitli fonksiyonları yerine getirir. Birçok potansiyel hatalar bu fonksiyonlar ile ilgilidir. Örneğin;

- Erken karar verme, gereksiz kuralın uygulanması, mevcut kuralı uygulamadaki başarısızlık, karar verme fonksiyonun kapsamında düşünülebilir.
- Hedefteki değişikliklere erken veya geç cevap verme, kontrol yönünün yanlış seçilmesi tamin ve izleme hataları ile ilgilidir.
- Sıralama fonksiyonu arzu edilmeyen işlem basamağının icrası, gerekli adımın atlanması gibi hatalara neden olabilir.
- Problem çözme fonksiyonu ile ilgili potansiyel hataya örnek olarak yanlış kuralların formüle edilmesi gösterilebilir.
- Bir sinyalin tesbitindeki, hedefin ortaya çıkması işleminin kontrol ve rapor edilemesindeki başarısızlıklar algılama, tanımlama, ortaya çıkarma gibi fonksiyonlar ile ilgilidir.

Çalışan makine ve teçhizatın insan hataları: Çalışan makine ve teçhizat üzerinde yapılan bu tip hataları **ihmal** ve **görev** olarak iki kategoride toplamak mümkündür:

I. İhmal sınıfına giren hatalar **dikkat** ve **hafıza** hatalarıdır. Çalışanın dikkatini gerektiren durumlar ile ilgili olan dikkat hatalarına bir grup ölçü aletinde gösterilen değerlerdeki değişimleri izlemesi istenen kişinin bu değişimleri fark etme hatası tipik bir örnek olarak gösterilebilir. Benzer şekilde adından da anlaşılacağı gibi insan belleği ile ilgili olan hafıza hatasına çalışanın bir görevi yerine getirmeyi unutması gösterilebilir.

II. Görev sınıfına giren hatalar tanıma ve yorumlama hatalarıdır. Tanıma hatalarında bir nesnenin yanlış tanınıp doğru nesne gibi işleme tabi tutulması durumu ortaya çıkar. Yorumlama hataları ise verilerin yanlış anlaşılması sonucu yanlış işlemin yapılması durumlarıdır.

⁹B.S Dhillon., *ibid.*, s.46

3.Üretim Hataları:

Üretim aşamasında insanların sebep olduğu hatalar olup zayıf işçiliğin sonucudur. Çoğu zaman kullanım aşamasında hatanın ortaya çıkmasından sonra keşfedilirler. Bu tip hatalara

- Yanlış bileşenin kullanımı
- Bir bileşenin ihmal edilmesi
- Montajın plana uygun olmaması
- Yanlış lehimleme
- Ters sarım

gibi hatalar örnek olarak verilebilir. Bu tip hataların ortaya çıkışına sebep olabilecek bazı faktörler:

- Yetersiz çalışma hacmi
- Uygun olamayan çalışma düzeni
- Zayıf aydınlatma
- Yüksek/alçak ısı
- Makina, alet ve edevatın yetersiz insan mühendisliği tasarımı
- Taşıma, depolama ve kontrol teçhizatının yetersizliği
- Çok az veya yetersiz kontrol
- İş talimatlarını olamaması veya uygun yordam eksikliği
- Görev karmaşıklığı ve aşırı yük
- Zayıf personel seçimi, eğitimi ve motivasyonu
- Yetersiz iş planlama ve veri iletişimi
- Çalışanın dikkatsizliği ve ilgisizliği
- Doğru çalışma yordamlarının takibinden sapmalar

4.Kontrol Hataları: Bu tip hatalar kalite kontrol esnasında yapılan inceleme, denetleme ve kontrol aşamalarında ortaya çıkmaktadır. Kontrolün amacı hataların tesbiti olup kontrolün %100 olamayacağı nedeniyle bu tip hatalar oluşur. Kontrol hatası nedeniyle tolerans dahilindeki

bazı parçaların reddi tolerans dışı parçaların kabulü mümkün olabilir. Yapılan bir araştırmaya göre tolerans etkinliği %85 civarındadır.

5.Tesis Hataları : Bu tip hatalar alet veya makinanın tesisi esnasın oluşmakta olup başlıca neden, talimatlara veya planlanlara göre yapılan tesis işlemlerinde insan hatalarıdır.

6.Bakım Hatası : Alet veya teçhizat uygun olarak tamir edilmemesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Yanlış kalibrasyon, hatalı yağ kullanımı buna örnek olarak gösterilebilir. Cihazlar eskidikçe eskimeden dolayı bakım sıklığının artması nedeniyle bu tip hatalar da artacaktır.

7.Katkısal Hata: Bu sınıfta insan veya cihazla ilişkisi kesinlikle saptanamayan hatalar yer almaktadır.

8.5.İNSAN HATA OLASILIĞI TAKSONOMİSİ

İnsan güvenilirliği;*Bir iş veya görevin personel tarafından sistem faaliyetinin herhangi bir basamağında eğer zaman kıstası var ise arzı edilen minimum zaman içerisinde hatasız olarak tamamlanması olasılığı* olarak tanımlanırsa insan performansının kıymetlendirilmesinde insan hata olasılığının başlıca unsur olduğu daha iyi anlaşılır.

Güvenilirlik mühendisliği açısından insan güvenilirliğinin ölçüm ve öngörümü sistemin toplam güvenilirliğinin tesbitinde alet veya makina güvenilirliği ile insan güvenilirliğinin birlikte göz önüne alınması gerektiğinde sayısal olarak önem kazanır. İnsan güvenilirliğinin öngörümünde belirlenmesi gereken faktörler özet olarak:

a.Analiz prosedürlerinde, tek basamaklık işlemin yerine getirilmesindeki insan hata olasılıklarının tahmini gerekir.

b.Belirli bir makina veya teçhizatın işletim veya bakımında, alt sistem veya sistemde en önemli ve en sık ortaya çıkan hatalarının bilinmesi

c.Aynı cihaz, sistem veya altsistemde insan kaynaklı arızalarının sıklığı

d.Sadece yapılabilecek hataların olasılıkları değil aynı zamanda hangi hataların sistem performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olacağı ve operatör tarafından hatasız olarak faaliyetin tamamlanma olasılığı.



Şekil 8.4-Hata taksonomisi

Şüphesiz her cihazın faaliyetine ilişkin değerlerin gerekli insan operatörünün de performansına ilişkin değerleri içermesi gerekliliği güvenilirlik uzmanlarını insan performansının etkilerini içeren teknikleri geliştirmeye zorlamaktadır. Geleneksel hatalar arası ortalama zaman güvenilirlik tahminleri insan menşeyli arızaları içermemekte içerse dahi bu veriler sistem üzerindeki insanın etkisinin açıklanması için yeterli olmamaktadır.

Yukarıdaki şekilden de görülebileceği gibi cihaz arızalarına benzer şekilde insan hataları sistem üzerine etkileri açısından aynı değildir. Hatalar kaynakları açısından doğrudan operatörün sorumluluğunda olabileceği gibi bazıları sistemin geliştirilmesinden ve kullanım usullerinden kaynaklanabilir.

İnsan güvenilirliği operatör hatasının ortaya çıkış olasılıkları ile de hesaplanabilir. İnsan performansının temel ölçüsü olana İnsan hata olasılığı aşağıdaki şekilde tanımlanmış idi

$$\text{İnsan Hata Olasılığı} = P_{he} = \frac{E_n}{O_{pe}}$$

O_{pe} : Hatanın ortaya çıkabileceği toplam hal adedi,

E_n : Bilinen tip hataların toplamı

P_{he} : Belirli bir faaliyetin yürütülmesi esnasında insan hatasının ortaya çıkış olasılığı

Yukarıda belirtilen insan performansı hata olasılığına karşılık, insan performansının sistem performansını üzerindeki etkinliğini nicelik olarak tesbit amacıyla geliştirilen ve yaygın olarak kullanılmakta olan matematiksel form :¹⁰

$$Q_i = 1 - (1 - F_i P_i)^{n_i}$$

P_i : i tip hatanın ortaya çıkma olasılığı

F_i : i tip hata oluştuğunda arızanın ortaya çıkma olasılığı

n_i : i tip hatanın hatanın ortaya çıkabileceği toplam hal adedi

Q_i : i tip hata nedeniyle arızanın ortaya çıkma olasılığı

¹⁰ L.W Rook., "Evaluating The Human Error Contribution to Sytem Degration, 6. Annual of Human Factor Society, New York, 1962'den aktaran Meister D.. op.cit. 12(28)

9. İNSAN GÜVENİLİRLİK VERİLERİ

Güvenilirlik çalışmalarında insan güvenilirlik verileri önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmaların doğruluğu giriş verileri ile doğrudan etkilenmekte olup yetersiz veriler yapılan güvenilirlik öngörüm çalışmalarını yanlış yönlendirecektir. Bu nedenle verilerin toplanma ve analizine daha fazla önem verilmeli, ne, ne zaman, niçin ve nerede insan güvenliliği ile ilgili verilerin toplanabileceği hususlarına sağlıklı karar verilemelidir.

Günümüzde insan güvenliliği öngörüm çalışmalarına ilişkin metod ve tekniklerle ilgili çalışmaların yanında insan performansı verilerinin derlenmesine ilişkin çalışmalar da aynı paralelde sürdürülmelidir. Güvenilirlik, geçerlilik, otomasyon, ekonomi, objektiflik, nicelendirilebilirlik gibi standartlar veri toplama çalışmalarında göz önüne alınmalıdır.

9.1.GENEL GÜVENİLİRLİK VERİLERİ

İnsan güvenliliğine ilişkin verilerin incelenmesinde konunun daha iyi anlaşılabilmesi açısından genel güvenilirlik verilerini incelemekte yarar vardır. Bir ürünün yaşamında güvenilirlik verilerinin toplanabileceğine ilişkin mevcut kaynaklar insana ilişkin verilerin toplanmasında karşılaşılabilecek problemlerin anlaşılması açısından önemlidir.¹

- a.Tecrübe
- b.Tüketici arıza raporları
- c.Ürün geliştirme verileri
- d.Tamir raporları
- e.Tesis testleri
- f.İmalat ve kalite kontrol
- g.Kabul testleri
- h.Demostrasyon

Güvenilirlik verilerinin toplanabileceği bu aşamalarda dökümantasyon sistemi ve arıza raporlarının hazırlanmasında aşağıdaki hususlar göz önüne alınmalıdır.

¹ Balbir S.Dhillon, *H.Relaibility With Human Factors*. (New York: Pergamon Press, 1986), s.166

- a. Dizayn aşamasındaki çalışmalara son kullanıcıların dahil edilmesi
- b. Arıza raporlarının basit, açık olması.
- c. Tamir personeli, arızalı parçanın tamirinde dökümantasyonun önemini kavramalı
- d. Hatırlamaya ilişkin kodlamaları azaltmalı
- e. Formlara mümkün olduğunca istatistiki bilgilerin yazılması
- f. Kaydedilmiş verilerin süratle analizi ve geri beslemenin sağlanması

9.2.SİSTEM GELİŞTİRME AŞAMALARINDA İNSAN FAKTÖRÜ VERİLERİ

Bir sistemin geliştirilmesi aşamasında insan faktörüne ilişkin veriler göz önüne alınmak istendiğinde:

İlk **kavramsal** safhada matematiksel insan performansı verilerinin temini çok önemli bir problemdir. Bu safhada veriler; fonksiyon tahsisi, sistem etkinliği ve idame edilebilirliğinin değerlendirilmesinde gereklidir.

Sistem tanımlama safhasında ise bu verilere; sistem güvenilirliğinin hesaplanması, idameye ilişkin zaman ve performans verileri için gereklilik ortaya çıkar.

Sistemin **oluşturulmasından** sonra insan bileşeni güvenilirlik verilerinin doğruluk analizleri yapılmaya çalışılır.

İnsan faktörü verilerinin kullanılmasında tasarım problemlerine insan faktörlerine ilişkin verilerin uygulanabilirliğinin tesbitinde; uygulamanın pratik önemi, risk, geneleştirilme, takas gibi faktörler göz önüne alınmalıdır. İnsan faktörü uygulamalarında saklı birçok faktör olup bazı uzmanlar dizayn aşamasında bu faktörlere

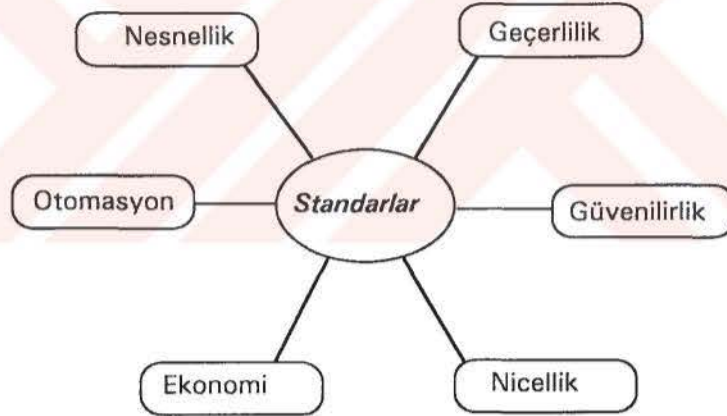
- İnsan faktörü tasarım standartlarının yetersizliği
- Eğitim noksanlığı
- Yönetimin karşı olması
- Bireysel tepkileri
- İnsan faktörü uzmanlarının eğitim noksanlığı
- İletişim noksanlığı
- Verilerin yetersiz formalarda sunulması gibi nedenlerden dolayı itibar etmezler

9.3.İNSAN PERFORMANSI VERİ SİSTEMİ

İnsan performansı güvenilirliğine ilişkin veri sisteminin geliştirilmesi esnasında uyulması gereken kuralları basit olarak aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz

- Veri toplama işlemi basit ve kısa olması
- Çeşitli kaynaklardan verilerin kabul edilebilir olması açısından sistemin esnekliği
- Sistem kullanıcıları açısından tanım ve terimlerin anlamlı olması
- Sistemi kendi verilerini istatistiki olarak analiz edebilmeli
- İnsan performansı güvenilirlik verileri ürün güvenilirliği öngörüm verileri ile entegre edilebilmeli
- İnsan-Makine bileşenlerinin çeşitli kombinasyonları ile ilgili olmalı
- Veri sistemi kullanıcıların durumları ile uyumlu olmalı
- Veri sisteminin çıktıları etkin bir formatta olmalı

9.3.1.İnsan Perfomansı Verilerinin Toplanması



Şekil 9.1-Veri toplama standartları

İnsan verilerin toplanmalarına ilişkin çeşitli teknikler mevcut olup yukarıdaki şekilde gösterilen altı yaygın standardın uygulandığı teknikleri dört ana grupta toplayabiliriz.

I.Grup: Bu grup zaman-hareket teknikleri, sürekli gözlemler, demonstrasyon ve örnek gözlemleri gibi manuel metodları içerir

II.Grup: Ehliyet testleri, mülakat, problem-kaza raporları, anketler gibi dolaylı manuel metodları kapsar.

III.Grup: Bu gruba bakım kayıtları, sistem test kayıtları, insan kaynaklı arızalar gibi sistem ölçümleri dahildir.

IV.Grup: Bu grup veri toplama ortamının yetersizliği, sistem çıktılarının büyük miktarda olması, sistem çıktılarının algılanmasının zor olması ve veri toplamanın tehlikeli olduğu hallerde kullanılan psikolojik-tepki kayıt sistemi, görev-performans kayıt sistemi gibi tüm otomatik metodları içermektedir.

Otomatik veya manuel veri toplama metodlarının birtakım avantaj veya dezavantajları olup bunları aşağıdaki TABLO I’de görüldüğü gibi özetlemek mümkündür.

TABLO I

Otomatik kayıt makinaları

FAYDALARI

- Veri toplama işleminde insan hatasını elimine eder
- Doğruluk ve hassasiyeti daha fazladır
- Kayıt işlemi hızlıdır
- Verilerde insan önyargı ve eğilimlerine yer verilmez
- Veri toplamada insanların zorluklarla karşılaşabileceği hallerde ölçüm mümkündür

MAHSURLARI

- Sürekli durumlarda bakım faaliyetini gerektirir
- Büyük çapta arıza olasılığı mevcuttur
- Maliyeti yüksek olabilir
- Nakil ve tesis zor olabilir.
- Genellikle çok özeldir

Diğer yandan insanın veri toplamada kayıt elemanı olarak kullanılmasının da fayda ve mahsurları olup TABLO II’de özetlenmeye çalışılmaktadır.

TABLO II

Veri toplamada insan kullanımı

FAYDALARI	MAHSURLARI
•Bakım gereksinimi çok az veya yok gibidir	•Makinalara kıyasla hassasiyetleri düşüktür
•Büyük çapta arıza olasılığı ihmal edilebilir	•İnsan hatasının ortaya çıkma olasılığı mevcuttur
•Bağıl olarak mobil olma özelliği vardır	•Etkinliği azdır
•Makinaların yetersiz olduğu durumlarda belirli değerlendirmeleri yapma özelliği	•Önyargı ve eğilimlerin etkisi olasıdır
•Adapte olabilme, yorum yapabilme	

9.3.2. İnsan hatalarının analiz ve sınıflandırılmasına ilişkin “nedensel” yöntem:

Yapılan incelemeler sistemlerde kazaların veya arzu edilmeyen performans düşüklüklerinin %70-90 oranındakilerinin nedenleri incelendiğinde kökeninde insan hatalarını yattığı gözlenmiş olup insan hatalarını karakterize edecek iki yaklaşım mevcuttur:² *Olasılıksal* ve *sebepsel*.

Olasılıksal yaklaşımda risk analizinin insan güvenilirliği yönüyle ilgilenilmekte ve nu analizde insan hatası donanım arızalarına benzer şekilde ele alınmaktadır. Belirli görevlerdeki insan hata oranları ile donanım arıza oranları tüm sistem güvenilirlik analizinin sayısal olarak değerlendirilmesinde gerekli girdileri oluşturmakta olup bu yaklaşım bazen belirli güvenilirlik düzeyinde sistem tasarımında faydalı olmaktadır.

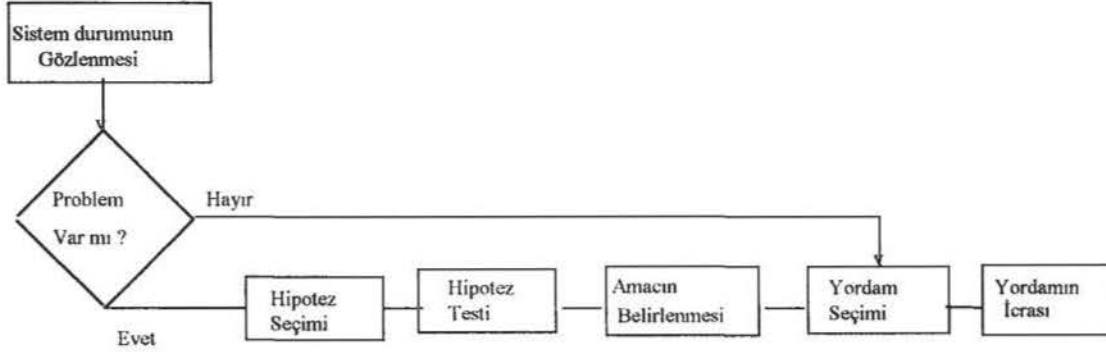
İnsan hatasını karakterize edecek ikinci yaklaşım ise hataların nadiren rastgele olduğu ve nedenleri veya hatanın ortaya çıkmasına katkısı olan faktörler açısından izlenebileceğidir. Bu sebepsel yaklaşım sistem tasarım ve eğitim programlarının değerlendirilmesinde ve değiştirilmesinde daha yararlıdır. Çalışmalar “Ne” olduğu üzerinde değil “Neden” olduğu üzerinde yoğunlaşır.

İnsan hatalarının sınıflandırılması ve analizine ilişkin bu metodolojide takip edilen faaliyet aşamalarını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

² William B.Rause, “Analysis and Classification of Human Error”, IEEE Transactions on System, Man and Cybhernetics, Vol:13, s.540, July-August 1983

1.Kavramsal Model:

Eğer insan hatalarını tasnif etmek üzere oluşturulacak şema, hatalarının ortaya çıkış sürecine dayalı olarak oluşturulursa daha kararlı olacağı açıktır. Böyle bir model tasnif şemasındaki kategorilerinin, aralarındaki ilişkilerin tesbitinde daha kullanışlı olupu uçak, gemi veya güç santrallerindeki bir kişinin icra ettiği görevin kavramsal olarak basite indirgenmiş şekli aşağıda görülmektedir.



Şekil 9.2-Kavramsal model

Normal bir faaliyet esnasında kişi, sistem durumunu gözleme, uygun yordamları seçme ve uygulama döngüsü faaliyetini sürdürürken sistem durum değişkenlerinden bir veya fazlası sınırlar dahilinde değilse durum anormal olarak nitelendirilir ve kişi bu duruma çare bulacak davranış içine girer. Yukarıda şekilde gösterilen görevler arası ilişkiler kesin olarak her türlü faaliyette uygulanacaktır anlamına taşımamaktadır. Görevler arası akış muhakkak daha karmaşık olacak, ancak bu şekildeki kavramsal model hata tasnif şemasının oluşturulmasına ışık tutacaktır.

11. Tasnif Şeması:

Çoğu hata tasnif şemaları *genel* ve *özgün* olmak üzere iki düzeyi içerirler. Genel kategori insan hatalarının ortaya çıktığı davranış süreçlerini ayırt ederken özgün kategoriler ise yanlış karar ve davranışların belirli karakteristiklerini tanımlar. Daha başka deyişle genel kategori davranış kökenli, özgün kategori ise görev kökenlidir.

Genel kategoriler önerilen kavramsal modele uygun olarak belirlenir. Bazı faaliyetlerde işin niteliğine bağlı olarak sınıflarda farklılık olması, sınıf miktarının artıp azalması doğaldır. Kavramsal modele uygun olarak oluşturulan tasnif şemasında göreve bağlı olarak sınıflardaki özgün kategoriler azaltılabileceği gibi azaltılmayıp hata yok yorumu da getirilebilir.

TABLO III
Tasnif Şeması

GENEL	ÖZGÜN	TANIM
1.Sistem durumunu gözleme	a. Aşırı b. Yanlış yorumlama c.Yanlış d.Eksik e.Uygun değil f. Kayıp	a.Değişkeninin doğru okunmasına rağmen tekra okunması b. Doğru okumanın yanlış yorumu c.Uygun değişkenin yanlış okunması d. Durum değişkenlerinin eksik okunması e. Uygun olmayan değişkenin gözlenmesi f. Okuyamama
2.Hipotez seçimi	a. Uyumsuz b.Olasısız c.Pahalı e.İlgisiz	a.Gözlenen durum değişkeninin nedeni değil b.Nedeni olabilir fakat daha etkinleri var c.Para ve zaman olarak pahalı d.Fonksiyonel olarak ilgisiz
3.Hipotez testi	a.Eksik b.Kabul c.Red d.Kayıp	a.Çözüme erişmeden durma b.Yanlış karara erişme c.Doğru çözümün reddi d.Hipotezin test edilmemesi
4.Amacın Seçimi	a.Eksik b.Yanlış c.Gereksiz d.Kayıp	a.Amac eksik belirlenmesi b.Yanlış amacın seçim d. Katkısal olmayan amacın seçimi e.Amacın seçilmemesi
5.Yordamın Saptanması	a.Eksik b.Yanlış c.Gereksiz d.Kayıp	a. Seçim amaca tam ulaşım sağlamaz b.Yanlış amaca ulaştırır c. Amaca ulaşmak için bu yordama gerek yok d. Gerekli yordam seçilmemiş
6.Yordamın İcrası	a.İhmal b.Tekrar c.İlave d.Sıra e.Zamanlama f.Ayrık g.Sürekli h.Eksik i.İlgisiz	a.Gerekli işlem basamağının ihmal edilmesi b.Gerekli adımın gereksiz tekrarı c.Gereksiz adımın icrası d.Gerekli adım sırasında icra edilmemesi e.Adımın çok erken veya geç icra edilmesi f.Ayrık kontrol yanlış pozisyonda g.Sürekli kontrol kabul edilemez boyutta h.Yordamın tamamlanmadan bitirilmesi i.İlgisiz ve uygun olmayan adımın icrası

*William B.Rouse, "Analysis and Classification of HE". IEEE

Transactions on system and cybernetic V.13, 1983'den adapte edilmiştir.

Sınıflandırma şeması kullanılırken kavramsal modele dayalı olarak önce genel kategoriler saptanır. Daha sonra her kategori içinde iligü özgün kategoriler belirlenir. Bu kategorilerin belirlenmesi görev bölgelerinin yapısına, çalışmanın amacına ve mevcut veri tiplerine göre yapılır.

iii. Veri toplama: İnsan hataları üzerine yapılacak çalışmalarda hata ile sonuçlanabilecek işlemler hakkında temel bilgilerin bilinmesine gerek olup bu bilgiler durum değişkenlerini ve buna bağılı insan reaksiyonuna ilişkin konuları da kapsamalıdır. Bu gibi somut bilgilerin yorumlanmasına katkısı olabileceğı düşünceyle gözlemci notları, mülakat ve anketlerin de faydalı olabileceğı değerlendirilmelidir.

iv. Hataların Tanımlanması: Hataların tanımlanması toplanan verilerin analizini, gözden kaçma veya işe dayalı tasnifini gerektirir. Bu nedenle alınacak tüm kararların ve yapılacak tüm hareketlerin bilinmesi buna balı olarak ihmal veya aktivitenin gerçekten hata mı yoksa tercih veya ilgisiz olup olup olmadığına karar verilir.

v. Sebep ve katkı faktörlerinin tanımlanması:

Eğer yapılan çalışmalar program veya sistem tasarımların arasındaki farkı bulmaya yönelik ise deneysel tasarım metodlarının uygulanması, sonuçların gözlenerek önemli farklılığın tesbit halinde nedenlerinin araştırılmasına girişilir. Ancak, araştırma her zaman sistemlerin mukayesesine yönelik olmayıp genellikle belirli program veya sistemin değerlendirilmesine yöneliktir. Bu gibi durumlarda planlı mukayeselere dayalı çalışmalar yapılamayacağından korrelasyon çalışmaları ön plana çıkar.

Etkin katkı faktörleri sistemden sistem farklılık göstereceğı için genel bir sınıflandırma mümkün değildir. Ancak çok genel anlamda aşağıdaki sınıflandırma göz önüne alınabilir.

- I. İnsanın doğal limitleri
- II. Sistemin doğal limitleri
- III. Katkısal şartlar
- IV. Katkısal olaylar

vi.Hataların Tasnifi:En uygun yol her hata için bir paragraflık tanımın yapılması, daha sonra uzmanlar tarafından ana hata sınıflarına; bu tanımlamalara, hata tasnif formlarına, katkısız faktörler değerlendirme formlarına bağlı hataların tasnifidir.

vii.İstatistiksel Analiz:Mukayeselerin analizi doğrudan doğruya varyans analizi veya t-tesleri ile gerçekleştirilebilir. Hata kategorileri arasındaki farkın önemi için de ayrı ayrı varyans analizi yapılabilir. Katkısız faktörler ile hata frekansları arasındaki ilişkinin tesbitinde ise korrelasyon metotlarından yararlanır.

9.4.İNSAN GÜVENİLİRLİK VERİ BANKALARI

Daha önce bahsedildiği gibi veri bankaları insan güvenilirliği analizlerinde önemli rol oynamakta olup günümüzde insan güvenilirliğine ilişkin veri eksikliği önemli bir prpbem olmaya devam etmektedir. Birçok uzman insan güvenilirliği veri bankalarının oluşumu ile ilgili çeşitli formatlar ileri sürmekte olup ideal bir veri bankası, veriler ile ilgili olarak aşağıda belirtilen faktörlere cevap verebilmelidir³

TABLO IV
Verilerle ilgili faktörler

<u>FAKTÖR</u>	<u>FAKTÖR TANIMI</u>
1.	Görev Tipi
2.	Çevre şartları
3.	Sistem öğeleri
4.	Sistem karakteristikleri
5.	Sistem tipi
6.	Motivasyon
7.	İlgili kişinin ehliyet ve eğitim düzeyi
8.	Psikolojik gerilim
9.	Yazılı talimatların kalitesi

³ A.D Swain., "Development of a human error rate data bank". Proceedings of Human Reliability Workshop, February,1971

Hernekadar ideal bir veri bankası mümkün olmasada en azından oluşturulacak veri bankası aşağıdaki formata uygun olmalıdır.

Tip 1. Tek tek parametreler ilgili ham veriler

Tip 2. Olasılıksal olmayan durumlar ile ilgili bazı sistem karakteristikleri

Tip 3. Hata oranı oluşumları ile ilgili olasılıklar

Tip 4. Görev tanımlama olasılıkları

İnsan veri bankalarının oluşumu için gerekli verilerin temini ancak üçkaynaktan mümkündür. Bunlar : Uzman kişilerin kanaatleri, laboratuvar testleri ve faaliyet anında yapılan ölçümler olup dolayısıyla veri bankalarını da üç kategoriye ayırmak mümkündür:⁴

I Deneye dayalı veri bankaları:

Laboratuvarda deneyler sonucu oluşturulur. Hataya sebep olabilecek diğer etkenlerden en az düzeyde etkilenilir. Bu nedenle güvenilirliği fazla olmasına rağmen, nekadar dikkatli oluşturulsa dahi diğer etkenler göz ardı edilmemelidir.

II.Uygulamaya dayalı veri bankaları:

Deneye dayalı veri bankalarına nazaran daha gerçekçidir. Çalışma ortamındaki gerçek faaliyetlere dayalı olduğundan oluşturulması daha zordur. Bu çeşit bankalardan elde edilen veriler daha tatmin edicidir.

III.Öznel veri bankaları:

Bu çeşit bankalar uzman kişilerin kanaatlerine. Çok az uzman kişiden çok miktarda veri toplanabileceğinden geliştirilmesi kolay ve ucuzdur. Bu çeşit veri bankaları insan güvenilirliği analizinde kullanılacak ise aşağıdaki gereksinimlerin karşılanması gerekir:

- Geçerlilik: Varsayıma dayalı veri bankaları bazı hataları içerecektir. Bu yüzden deneye dayalı verilere nazaran doğruluk düzeyinin az olduğu kabullenilmelidir.

⁴ David Meister, "Subjective Data in Human Reliability Estimates", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, California, Jan 17-19, 1972

- Uzman Varsayımı: Varsayımaya dayalı veri, konusunda deneyimli ve uzman kişilerden elde edilmelidir. Örneğin, insan güvenilirliği uzmanından ziyade, operatörden verilerin eldesi daha akılcıdır.
- Performans boyutları: Tamnin edilecek performansın boyutları göz önüne alınarak kullanılacak tekniğe karar verilmelidir.
- Yargı tanım seviyesi: Tahminlerle birleşik performans sekil faktörleri erken aşamalarda belirlenmeli. Hatta belirli bir görev için göz önüne alınması gereken hataların tipleri açıklığa kavuşturulmalıdır.
- Prosedür tanımı: Varsayımaya dayalı tahmin eldesi için uygulanabilir prosedür belirlenmelidir.

9.5. ÖRNEK İNSAN PERFORMANSI VERİLERİ

İnsan güvenilirliği ile ilgili analizlerde verileri faaliyet sahasının özelliklerine bağlı olarak gruplamak ve bunları çeşitli kaynaklardan elde etmek mümkündür. Örneğin bu grupları aşağıdaki şekilde belirlemek mümkündür.

- İnsan hataları
- Kaza miktarı
- Kaza ve başlıca kırımların özellikleri
- Kırım miktarı

Kazaların miktar ve özelliklerine ilişkin veriler; Eğitim personeli, atölye tasarımcıları, güvenlik personeli, atölye yöneticileri gibi kaynaklardan toplanabilir. Benzer şekilde kırımlar ile ilgili kaynak olarak sigorta şirketleri, atölye yöneticileri, güvenlik personeli kullanılabilir. İnsan hataları faaliyet sahalarına bağlı olarak dikkat, basit görevler, karmaşık görevler, kontrol görevleri, izleme, anında reaksiyon gibi çeşitli sahalarda sınıflandırılrsa dahi her saha ile ilgili temel bilgiler hata karakteristiklerinde maksimumunu kapsayacak şekilde düzenlenmelidir.

Örnek olarak aşağıdaki tabloda bazı insan davranışlarına ait hata verileri özetlenmeye çalışılmıştır.⁵

⁵ David Meister, "Human Factors in Reliability". *Reliability Handbook*, der.W.G.Ireson, (New York:McGraw Hill, 1966), ss.12(29)-12(35)

TABLO V
Örnek İnsan Hata Oranları

SIRA	HATA TANIMI	Hata Oranı /Milyon	Hata Oranı /Ay *
1	Ölçü aletini yanlış okuma	5000	-
2	Valfi doğru kapamama	1800	-
3	Yanlış lehimleme	6460	-
4	Anahtarı uygun kapamama	1128	-
5	Civata ve somunu sıkıştıramama	4800	-
6	Civata ve somunu monte edememe	600	-
7	Mekanik bağların hatalı ayarı	16700	-
8	Talimat okumada yöntem hatası	64500	-
9	Hortumu yanlış bağlama	4700	-
10	Doğru prosedürün yanlış izlenmesi		0.0401
11	Bakım personelinin hatalı ayarlaması		0.0134
12	Tesis hatası		0.0401
13	Operatör tarafından taleplerin yanlış yorumlanması veya anlaşılması		0.0076
14	Cihazın dikkatsizce veya uygunsuz kullanımı		0.0706
15	Bakım personeline uygun olmayan servis veya parça değişimi		0.0153

* Bu hatalar su basınçlı reaktörler ile ilgilidir.

İnsan hatası arıza oranlarının laboratuvar ortamında tesbiti sonunda elde edilen sonuçlara örnek olması açısından aşağıda belirtilen ⁶ Tablo VI gösterilebilir. Bu tablodaki insan hatası oranları (insan güvenilirliği) kontrol elemanları ve göstergelerin boyutları ile ilgili olarak saptanmıştır. Bu arıza oranları belirtilen ölçülere sahip kontrol elemanı veya göstergelerin doğru kullanımı olasılıkları ile ilgili olup değerler laboratuvar ortamında elde edildiği için doğal olarak

⁶ David Meister, ibid.

bir miktar hata içereceği göz önüne alınmalıdır. Önemli olan doğruluğunun hassasiyetine bakmaksızın alet performas güvenilirliği ile mukayese edilebilecek değerlerin mevcut olmasıdır.

TABLO VI

Kontrol elemanları ve göstergelerde insan hata oranları

SAYAÇLAR

Boyut (inç)	
1	0.999
1-2	0.9998
3 ve yukarı	0.9995
Rakam veya Hane Adedi	
1-3	0.9997
4-5	0.9993
7 ve yukarı	0.9995

İŞARETLEME

Rakam	
2	0.9998
3	0.9994
4 veya 5	0.9992
Kelime	
1 veya 2	0.9999
3 veya 5	0.9995
Baskı Yüksekliği(inç)	
1/5 veya fazal	0.9997
1/8	0.9994

İŞIKLANDIRMA

Çap (inç)	
1/4'den az	0.9995
1/4-1/2	0.9997
Yanan ışık adedi	

1 veya 2	0.9998
3 veya 4	0.9975
8 veya 10	0.9946
Gösterim	
Ani(yanıp sönme)	0.9998
Sürekli	0.9996

SKOPLAR

Bölge işaret adedi	
1 veya 2	0.9980
3 veya 5	0.9997
6 - 10	0.9999
Mevki tayini	
Tahmini	0.9975
Şablonla	0.9990
İmleçle	0.9995
Skop boyutu(İnç)	
3	0.9990
4 ve yukarı	0.9999
Görüş açısı(der.)	
0-45	0.9999
45-80	0.9995
Hedef görüntü süresi(san.)	
3	0.9990
5	0.9995
6 ve yukarı	0.9999

EL KUMANDA KOLU

Uzunluk (inç)	
6-9	0.9963

12-18	0.9967
Hareket Genişliği(Derece)	
5-20	0.9981
30-40	0.9975
Kontrol Mukavemeti(lib)	
5-10	0.9999
10-30	0.9992
Destek	
Var	0.9990
Yok	0.9950
Kontrol ve görüntü arası zaman(sn)	
0.3	0.9967
0.6 veya 1.5	0.9963
Kontrol/Görüntü hareket oranı	
1:1 veya 1:3	0.9936
1:4 veya 1:6	0.9967
Kontrol/Görüntü hareket ilişkisi	
Doğrusal veya pozitif	0.9998
Ters	0.9970

LÖVYE

Uzunluk	
Uzun	0.9990
Kısa	0.9920
Hareket düzlemi	
Dikey	0.9992
Yatay	0.9999
Kontrol hareketi genişliği(der.)	
5-10	0.9964
10-20	0.9970

30-40	0.9975
El kontrol direnci(lb)	
2-5	0.9999
10-20	0.9992
Kol kontrol direnci(lb)	
2-5	0.9990
10-20	0.9999
Hareket yönü	
Doğrusal	0.9999
Ters	0.9985
Kontrol/Görüntü hareket oranı	
1:1	0.9957
1:3	0.9970
1:6	0.9983

TUŞLU DÜĞME

Boyut	
Minyatür	0.9995
1/2 inç ve büyüğü	0.9999
Bir gruptaki düğme adedi	
A. Tek sıra veya sütun	
1-5	0.9997
6-10	0.9995
B.Çift satır veya sütun	
1-5	0.9997
6-10	0.9995
C. Matiks	
6-10	0.9995
11-25	0.9995
Bir grupta basılan düğme adedi	

2	0.9995
4	0.9991
Kenardan uzaklık	
1/8-1/4	0.9985
1/2 veya fazla	0.9998
Detent	
Var	0.9998
Yok	0.9993

DÖNER SEÇİCİ

Boyut(çap), inç	
1-3	0.9995
3 veya fazla	0.9999
Pozisyon Adedi	
3-6	0.9997
6-12	0.9995
Pozisyonlar Arası Mesafe, (der.)	
15'den az	0.9997
15-30	0.9995
30'dan fazla	0.9995
Gösterge Stili	
Nokta	0.9995
Çizgi	0.9991
Ok	0.9998

AŞAMALI ANAHTAR

Boyut	
Minyatür	0.9997
Normal veya Büyük	0.9999
Pozisyon Adedi	

2	0.9999
3	0.9991
Hareket Yönü	
Dikey	0.9999
Yatay	0.9991
Hareket Açısı	
20	0.9997
40	0.9998
90	0.9999
Bir gruptaki anahtar adedi	
A.Tek sıra veya sütun	
1-5	0.9998
6-10	0.9996
B.Çift satır veya sütun	
1-5	0.9998
6-10	0.9998
C.Matriks	
6-10	0.9996
11-25	0.9988
Kenardan uzaklık	
1/8-1/4	0.9993
1/2 veya fazla	0.9998

KABLO BİRLEŞTİME

Kablo Ağırlığı	
Hafif(0.9997
Ağır	0.9992
Kilitleme metodu	
Yok	0.9987
Otomatik	0.9990

1/4 turdan az	0.9992
1/4 turdan fazla	0.9995
Kenet	0.9997
Pin veya İplikli	0.9999

KABLO AYIRMA

Kablo Ağırlığı	
Hafif(0.9999
Ağır	0.9997
Kilitleme metodu	
Yok	0.9999
Otomatik	0.9999
1/4 turdan az	0.9998
1/4 turdan fazla	0.9999
Kenet	0.9995
Pin veya İplikli	0.9997

Yukarıdaki tablolarda verilen değerler ayrı ayrı kontrol ve görüntü elemanlarına ait olup hata oranları belirtilen ölçülere sahip kontrol veya görüntü elemanlarının doğru kullanılmalarının olasılıklarıdır. Bu değerler laboratuvar ortamında elde edildiklerinde dolayı tahmin hatalarını içermekte bu yüzden yapılan çalışmalarda sadece rehber olarak kullanılmalıdır. Mühim olan alet performansları ile insan performanslarının mukayese edilebileceği değerlerin mevcut olmasıdır.

TABLO VII

Genel Hata Oranı Tahmini Değerleri

Tahmini oranlar	FAALİYET	Tahmini oranlar	FAALİYET
10 ⁻⁴	Tuşuz yerine tuşlu anahtarın seçimi(Bu değer operatörün yanlış yorumlaması ve anahtarın doğru olduğuna kanaat getirmesine ilişkin karar hatasını içermez)	~1.0	Yukarıdakinin aynısı fakat yanlış anahtar doğru konumda değil

10 ⁻³	Şekil ve yer itibari ile benzerlik göstermeyen anahtarın seçimi; değer karar hatasını içermez.	~1.0	Eğer operatör herhangi bir adımda birbirine çok yakın iki anahtar veya valften birini doğru çalıştıramaz ise diğerini de doğru çalıştıramaması.
3*10 ⁻³	Genel insan iletişim hatası. örneğin. etiketi yanlış okuma ve bu nedenle yanlış anahtarı seçme	10 ⁻¹	Denetmenin operatör tarafından yapılan ilk hatayı fark etmemesi
10 ⁻²	Kontrol ortamında atlanan faaliyetin durumuna ilişkin gösterge veya ekranın bulunmaması halinde genel insan ihmal hatası	10 ⁻¹	Yazılı çeklist veya yazılı direktif yok ise farklı vardiyalarda olan personelin donanım kontrol hatası
3*10 ⁻³	İhmal edilen maddelerin prosedür içinde saklı olması halinde insan hatası	5*10 ⁻¹	Çeklist olmaksızın denetmenin genel dolaşarak yaptığı kontrol faaliyetinde valflerin arzu edilmeyen konumda olduğunu tesbit hatası
3*10 ⁻²	Tekrar başka kağıtta hesaplamaksızın basit aritmetik hata	0.2-0.3	Tehlikeli aktivitelerin çok sık olduğuna ilişkin yüksek gerilim düzeyinde genel hata oranı
1/x	Operatörün yanlış anahtara erişmesi ve kısmen benzer anahtarı seçimi (x arzu edilen anahtarın yanındaki yanlış anahtar miktarı olup 1/x beş veya altı maddeye uygulanabilir)	2 ⁽ⁿ⁻¹⁾ y	Olağanüstü hallerde yapılan hatanın telafisine çalışıldığı yüksek düzeyin stres bulunması halinde ilk hata oranı, y, her girişimde, n, yanlış bir girişimden sonra ikiye katlanır. Nu durum hata oranı 1.0'a veya zaman bitinceye kadar devam eder.
9*10 ⁻¹	Oldukça yüksek gerilim ortamının doğmasından sonra operatörün ilk 5 dakikadan sonra doğru hareket edememesi	10 ⁻²	Oldukça yüksek gerilim ortamının doğmasından sonra operatörün birkaç saat sonra doğru hareket edememesi
10 ⁻¹	Oldukça yüksek gerilim ortamının doğmasından sonra operatörün ilk 30 dakikadan sonra doğru hareket edememesi	y	Büyük çapta gerilim ortamının doğmasından günler sonra normal hata oranına, y, erişim mümkündür.

10 ⁻¹	Operatör yanlış motorlu valfe erişmekte ve gösterge lambasından valfin doğru konumda olduğunu, seçtiği anahtarın yanlış olduğunu farketmeksizin valfin konumunu değiştirmesi	~1.0	Oldukça yüksek gerilim ortamının doğmasından sonra operatörün ilk 60 saniye içinde doğru hareket edememesi
------------------	--	------	--

Sandia Laboratuvarlarında insan güvenilirliği. analistleri tarafından United Kingdom Atomic Energy Authority, Danish AEC, Imperial Chemical Industries, Ltd.(ICI) of Great Britain gibi kuruluşlardan nükleer güç santrallerindeki benzer faaliyetler hakkında insan performansı hata oranlarına ilişkin birinci grup veriler ile silah üretim, bakım ve test işlemlerinde yine nükleer güç santrallerindeki insan hatalarına benzer veriler toplanarak analize tabi tutulmuştur.

Yukarıdaki tablo bağımsız insan güvenilirliği analistlerinin bağımsız değerlendirmeleri sonunda yukarıda belirtilen verilerden elde edilen genel insan hata oranı tahminlerini içermektedir⁷. Bu değerlendirmeler analistler tarafından personel ehliyet seviyeleri, önceki işleri, işletme prosedürleri, kontrol, ekran ve işletmen tarafından okunan veya kullanılan alet dizaylarının gözden geçirilmesinden sonra yapılmıştır. Gerekli bilgiler işletmenler, yöneticiler ve mühendislerle yapılan mülakatlarda, kontrol odalarının, test, bakım ve kalibrasyon hizmetlerinin gözlenmesinden, yazılı materyal ve fotoğrafların incelenmesinden elde edilmiştir.

Genellikle, analistler tarafından yazılı talimatlar, kontrol fotoğrafları, ekranlar, işletmen tarafından kullanılan valf ve benzeri donanım ile okunan göstergeleri içeren iş gereksinimlerinin tedaylı tanımlarına dayalı olarak yapılan bağımsız tahminler birbirine çok yakın çıkmıştır. Tahminlerde insan güvenilirlik değerlerinin aşırı tahminlerin kaçınılmıştır.

Daha sonra ise insan hata oranlarına dayalı olarak geliştirilen analitik yaklaşımda görev; algılama, idrak ve davranış gibi yönleriyle ele alınan bağımsız adımlara bölünerek her adım: GİRDİ, İŞLEM, ÇIKTI şeklinde güvenilirlik yönünden incelenmiştir.

9.6.İNSAN HATA ORANI VE GÜVENİLİRLİK VERİLERİNİN KULLANIMI

Herhangibir faaliyete ilişkin güvenilirlik çalışmalarında çeşitli veri bankalarında elde edilen verilerin gerek tasarımda gerekse iş prosedürlerinin saptanmasında genellikle amaçlanan en yüksek güvenilirlik değerlerinin erişimi amacıyla çeşitli şekillerde kullanımı mümkündür.

⁷ E.W. Hagen, "Control and Instrumentation". Nuclear Safety, C.17, No.3, May-June 1976

I. Tasarımcının en yüksek güvenilir kullanım olasılığı sağlayan donanımı tercih etmesi halinde uygun elemanların seçimi: Her eleman belirli ölçülere her ölçünün de olasılığı olduğuna göre belirli kontrol veya göstergenin sahip olduğu insan güvenilirliğinin derecesi tahmini bu olasılıkların birleştirilmesi ile elde edilir. Kontrol elemanı veya göstergenin güvenilirliği her ögenin güvenilirliklerinin çarpımı ile elde edilir.

Örneğin;

Joy Stick

Bileşenin Ölçüleri	Değer	Güvenilirlik
Kol uzunluğu	6-9 inç	0.9963
Kol hareket genişliği	30-40 Derece	0.9975
Kontrol direnci	5-10 lb	0.9999
Sonuç:		0.9937

Tasarımcı elde edilen sonucun tatmin edici olup olmadığına bakar ve diğer kombinasyonları tatmin edici sonuca, muhtemelen güvenilirliği en yüksek olan değere, ulaşıncaya kadar denemeye devam eder.

II. Tasarıma benzer şekilde yazılı prosedürlerin analiz edilerek prosedürün takip edilmesi hataların ortaya çıkma olasılıklarının öngörümü mümkündür. Bunun için her adım ayrı ayrı ele alınıp **uyarıcı girdi**, **dahili işlem** ve **çıktı** şeklinde değerlendirmeye tabi tutulur.

UYARICI GİRDİ: Kontrol panellerindeki görüntüler, işaretler, valf konumu, anahtar pozisyonu, işaretler, yazılı talimatlar ve diğer sinyaller olabilir.

Örneğin, X ışığı yeşil olduğunda operatörün Y düğmesine basması düşünüldüğünde:

Uyarıcı girdi olan X ışığı aşağıdaki karekteristiklere sahiptir.

Çap, 1/4 - 1/2 inç	0.9997
Yanan ışık miktarı 3 veya 4	0.9975
Yanma sürekli	0.9996
Sonuç:	0.9968

DAHİLİ İŞLEM: İşletmenin duyuşsal durumu ile yakınen alakalı düşünme ve karar verme faaliyeti.

Dahili işlem olarak yanan ışığın operatör tarafından algılanabilmesinin güvenilirliği, basit düşünme işlem güvenilirliği, 0.9990 şeklinde keyfi bir değer olarak ele alınabilir.

Bu ışık ile ilgili hata olasılığının gerçekçi bir tahmininde bulunabilmek için ışığın yandığı alet veya cihaz konfigürasyonunu hakkında bazı bilgilere gereksinim vardır.

ÇIKTI: İşletmen tarafından; anahtar, valf, sözlü emir, yazma veya diğer aletlerin kullanımı şeklinde gösterilen faaliyet.

Çıktı, Y düğmesinin karekteristikleri:

Boyut, minyatür	0.9995
Tek sütun, 1-5	0.9997
Kenarlardan uzaklık, 3/8-1/2 inç	0.9993
Detent, yok	0.9998
Sonuç	0.9983

Bu adıma ililikin insan performansının güvenilirlik tahmininde elemanların seri olduğu düşünülüp girdi, işlem ve çıktı değerlerinin çarpılması gerekir.

$$\text{Işık}(0.9968) \times \text{İşlem}(0.9990) \times \text{Düğme}(=0.9983) = 0.9941$$

Benzer işlem prosedür içindeki tüm adımlar için yapılmalıdır. Böylece çeşitli adımların hesaplanıp, sistem yapısına bağlı olarak (seri, paralel, karmaşık) ardışık hesaplamalar sonunda tüm prosedürün insan güvenilirlik değerin erişilir. Bu cihaz güvenilirliği anlamına gelmeyip, tüm sistemin güvenilirliğinin, belirli faaliyetin yerine getirilmesinde, belirlenmesi amacıyla hesaplanan ,insan ve alet güvenilik değerlerinin **çarpımını** gerektirir.

10.İNSAN GÜVENİLİRLİĞİ ANALİZ TEKNİKLERİ

İnsan bileşenleri ile birbirine bağlanmış sistemlerde, toplam sistemin öngörülen güvenilirliği insan ögesinin güvenilirliğini de kapsaymalıdır. Bu nedenle insan güvenilirliğinin öngörümü ve ölçülendirilmesi esastır. Son yıllarda bu istikamette geliştirilen birçok yöntem olup hepsinde ortak olan noktalar:

- I. Görev açıkça tanımlanmalı
- II. Uygulanan yaklaşım kolaylıkla formüle edilebilmeli
- III. Yaklaşım alt görev alanlarına veya görev bileşenlerine bölünmeye elverişli olmalı
- IV. Alt görev güvenilirlik verilerine görev şartlarını karakterize eden parametreler ile birlikte ulaşılabilmelidir.

10.1. İNSAN HATA ORANI ÖNGÖRÜM TEKNİĞİ(*Technique for Human Error Rate Prediction (THERP)*):

İnsan hata oranı öngörümünde en yaygın olarak kullanılan bu teknik; insan davranışlarını etkileyen sistem karakteristikleri, işletme yordamları, donanım güvenilirliği gibi faktörlerle birlikte düşünülen insan hatalarından kaynaklanan sistem performansındaki düşüşün değerlendirilmesine dayanır.¹

İnsan güvenilirliği analizinde yapılacak çalışmalar nitelik veya nicelik olarak dört parametrenin tahminidir:

1. Görev Olasılığı: Belirli zaman periodundan bir görevin hatasız tamamlanma olasılığıdır.
2. Hata Düzeltme: Yanlış görev performansının tesbit edilmesi ve düzeltilmesi olasılığıdır.
3. Görev Etkileri: Hatalı ve düzeltilmemiş görev performansının sistemde arzu edilmeyen sonuçlara sebep olma olasılığıdır.
4. Etkinin Önemi: Maliyet veya diğer açılardan arzu edilmeyen etkilerin önem dereceleri

Netice olarak THERP tarafından kullanılan iki temel ölçü:

- I. Sistem arızasına sebep olabilecek hata veya hata gruplarının olasılığı

¹ D.S.Alain, "Shurcuts in Human Reliability", *Generic Techniques in System Reliability Assesment*, Der., E.J.Henley, J.N.Lynn, s.394, Noordhoff:1976

II. Belirli sınıflardaki hatalara sebep olabilecek faaliyetler

THERP'de takip edilecek işlem basamakları eğer insan faaliyetleri cihaz çıktıları yerine düşünülürse geleneksel güvenilirlik analizindeki basamaklara benzer:²

1.Sistem veya Alt-Sistem arızalarının tanımlanması:

İnsandan kaynaklanan ve insan hata etkilerinin tahminini gerektiren olaylardır

2 İlgili insan faaliyetlerinin listelenmesi ve analizi:

Bu adım genellikle görev analizi olarak tanımlanmakta olup tüm insan tarafından yerine getirilen faaliyetler ve bunun sistem görev ve fonksiyonları ile ilişkisi belirlenir.

3.Her bir bireysel veya grup faaliyetlerin oranlarının tesbiti:

4.Sistem arızaları üzerindeki insan hatalarının tahmini etkileri:

Bu çalışmalar genellikle insan güvenilirliği analizinin sistem güvenilirlik analizi ile entegrasyonunu gerektirir

5. Sistem değişiklik tavsiyeleri ve yeni sistem arıza oranlarının hesaplanması:

Bu adım ardışık işlem basamaklarının doğal sonucu olup insan güvenilirlik analizinin insan mühendisliği tasarım çalışmalarında alet olarak kullanımına da örnek teşkil eder.

Yukarıda belirlenen beş adımı kapsayan THERP, tekrarlı bir yordam olup insan hatalarından kaynaklanan sistem performansındaki düşüşler uygun seviyeye gelinceye kadar işleme devam edilir.

İşlem basamaklarının aynı sırada olma zarureti yoktur. Çoğu insan faktörü analistleri bu metodu bilmekte olup tüm olası insan faaliyetleri ve değerlendirme kapsamına giren tüm yordamlar sistem ve görev analizi metodları ile saptanır. Görev analizi çalışmalarında olasılık ağacı metodu önemli bir rol oynamaktadır.

² David Meister., "Methods of predicting human reliability in man-machine systems", *Human Factors*, C.6, ss.621-646, 1962

THERP sonunda görev güvenilirliklerinin sayısal tahminleri, insan faaliyetlerinin ara bağlantıları, davranışsal faktörlerin etkileri, alet performansları ve diğer sistem etkenlerine ait sayısal taminler üretilebilir. Teknik pratik, uygulanabilir, hızlı ve basit olup sistem performansı üzerinde insan hata etkilerinin sayısal tahminlerine ihtiyaç duyan sistem analiz ve tasarımcılarına yararlı veriler sağlar.³

THERP yaklaşımında dört temel safha olup insan güvenilirlik analizine ilişkin THERP yaklaşımının temel safhaları:

1. Tanıma:

- a. Birimin yerinde incelenmesi
- b. Sistem analizinden gerekli bilgilerin sağlanması

2. Niteliksel değerlendirmeler:

- a. Görev analizi
- b. İnsan güvenilirlik analizi olay ağacını oluştur

3. Niceliksel Değerlendirmeler:

- a. İnsan hataları öngörülerini belirle
- b. Performans faktörlerinin bağlı etkilerini belirle
- c. Bağımlılığı belirle
- d. Başarı ve hata olasılıklarını belirle
- e. Telafi faktörlerinin etkisini saptama

4. İşbirliği:

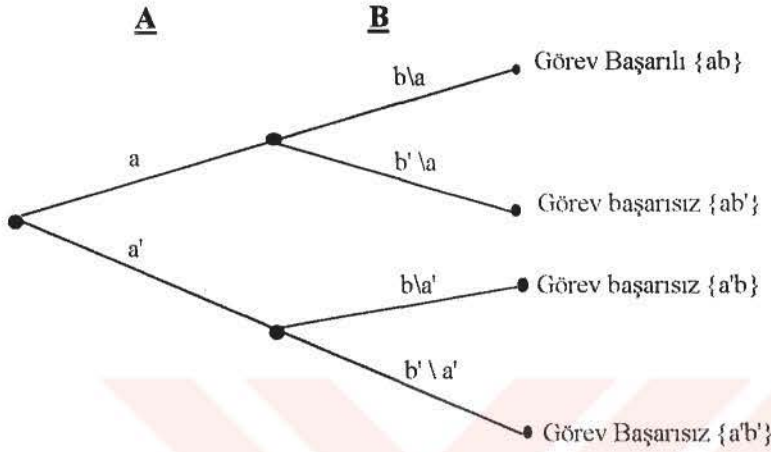
- a. Gerekirse hassaslık analizini yap
- b. Sistem analizine gerekli bilgileri sağla

I. Görev Analizi- Olasılık Ağacı Metodu:

Görevler ve görev sıraları insan güvenilirliği analizi olay ağacı ile modellenir. Bu tip analizin esası: Ağaç uygun bir faaliyet ile başlar ve insan güvenilirlik analiz ile ilgili görev analiz kısımlarını grafik olarak gösterecek şekilde zamana içinde aynı sırayı takip eder.

³ Kyung S.Park, Human Reliability Analysis. Prediction and Prevention of Human Errors, (Netherlands:Elsevier:Science Publishers B.V., 1987),s.223

- THERP olayların ikilik karar dallanmaları şeklinde modelize eder, her düğümde görev doğru veya yanlış olarak yerine getirilir.
- İlk dallanma hariç ağacın her dalının olasılığı şartlı olasılık olarak belirlenir.
- İlk dallanmaya eğer başka bir ağaçtan geliniyor ise veya önceki olayların ihtimaline dayalı bir olayı temsil ediyor ise şartlı olasılık konulabilir.



Şekil 10.1-İnsan Güvenilirlik Analizi Görev Ağacı:

Eğer büyük harfler olay ve görevleri, üslü küçük harfler başaramama veya hata hallerini, diğer küçük harfler başarı veya hatasızlık hallerini ifade ettiği düşünüldüğünde A ve B gibi iki görevin ardışık olarak icra edilmelerine ilişkin görev ağacı yukarıdaki şekilde ifade edilmektedir. Dikkat edilir ise A görevi önce icra edildiği için B görevi ile ilgili tüm olasılıklar A görevinin çıktısına bağlı olarak şartlı olasılık şeklinde ifade edilmektedir.

A ve B görevleri ile ilgili bağımlılıklar $b\backslash a$, $b\backslash a'$, $b'\backslash a$ ve $a\backslash b$ sembolleri ile ifade edilmektedir. Ağaç oluşturulduktan, her dalla ilgili olarak başarı veya başaramama şartlı olasılıklarının belirlenmesinde sonra her yolla ilgili olasılıklarının hesaplanması mümkündür.

Bazı durumlarda sistemin başarısı için insan faaliyetlerine ilişkin tüm setlerin doğru olarak icrası gerekebilir (seri sistem). Bazı durumlarda bir setteki insan faaliyetlerinin tümünün başarı ile oluşması beklenebilir (paralel sistem). Bu durumda seri bir sistemin

başarısı A ve B görevlerinin başarı ile sonuçlanmasına bağlı olup yukarıdaki şekilde bunu ifade eden tek bir yol mevcuttur. Bu yolun olasılığı, R_{seri} :

$$R_{seri} = Prob\{a\}Prob\{b|a\}$$

Tersine düşünülecek olursa, paralel sistem herhangi bir görevin başarı ile sonuçlanması halinde başarılı, tüm görevler başarısız olduğu hallerde başarısızdır. Paralellik söz konusu olması halinde tek tek başarı yollarının olasılıklarının toplanması gerekir.

$$R_{par} = Prob\{a\}Prob\{b|a\} + Prob\{a'\}Prob\{b|a'\}$$

$Prob\{Başarı\} = 1 - Prob\{Arıza\}$ olduğu için bir görevin başarılı performans olasılığı (veya görev güvenilirliği) *I-İHO* şeklinde de hesaplanabilir.

THERP içinde insan güvenilirlik analizindeki değerler her talep için başarılı performans olasılıkları olup insan ve makine güvenilirliklerini kombine ederek sistem güvenilirliklerinin eldesine ilişkin çalışmalar ilave varsayım ve dikkatli analizleri kapsamalıdır.

II. İnsan Hata Olasılıkları:

Görevlerin ağaç yapısı ile modellenmesinde sonra görev başarı olasılıklarının eldesi için İHO ve insan başarı olasılıklarının tahmini değerleri her dallanmada dallara başarı veya arıza olasılıklarının hesaplanması için gereklidir. İdeali, bu verilerin analize tabi tutulan kurum tarafından verilemesidir. Ancak genellikle bu mümkün olamamakta ve mevcut veri bankalarından, benzer çalışmalardan temin yönüne gidilmektedir.

Stres, ehliyet düzeyi, yönetsel kontrol, motivasyon v.b. davranışsal faktörlerin göz önüne alınmasıyla temel İHO değerleri oluşur. Bu veriler birbirinden bağımsız olarak oluşturulmuş faaliyetler ilişkin olup doğrudan doğruya değerlerin olasılık ağaç şemasına aktarılması arıza olasılığı tahminlerinde sıhatsız sonuçların eldesine sebep olur. Bu şartsız olasılık değerleri, çeşitli görev bileşenleri arasındaki bağımlılıkları göz önüne alarak yeniden değerlendirilmelidir.

Şartlı İHO, temel İHO'nun; sonraki görev öğelerini, görevleri, görevi icra eden insan miktarlarını göz önüne alarak değişikliğe uğramış halidir.

III. Bağımlılık:

Görevleri davranış sıraları şeklinde modellerken karşılaşılan en önemli problem görev öğeleri arasındaki bağımlılıktır. İki olaya, eğer olaylardan birinin şartlı olasılığı diğer olayın olması veya olmaması hallerinde aynı ise bağımsızdır. Yukarıdaki şekle dayalı olarak bu durum :

$$Prob\{b\} = Prob\{b|a\} = Prob\{b|a'\} \text{ ve}$$

$$Prob\{b'\} = Prob\{b'|a\} = Prob\{b'|a'\}$$

şeklinde özetlenebilir. Eğer bu şartlar söz konusu değil ise olaylar birbirini etkiler ve bağımlılık vardır.

Bağımlılık bir görev üzerinde çalışan insanlarda olabileceği gibi çeşitli ilgili görevleri icra eden bireyin kendisinde de söz konusu olabilir. THERP de bağımlılık derecelerine göre beş seviyeye ayrılmaktadır.⁴

TABLO I
Bağımlılık yüzdeleri

<u>SEVİYE</u>	<u>YÜZDE</u>
Yok	%0
Düşük	%5
Orta	%15
Yüksek	%50
Tam	%100

Pozitif bağımlılık ilk görevdeki başarısızlığın ikinci görevdeki arıza olasılığını arttıracığı farz edilir. Aynı ilişki başarı olasılığı içinde geçerlidir. N-1'inci görevde başarısızlık(veya başarı) olması halinde N. görevde ait başarı(veya başarısızlık) şartlı olasılığının hesaplanması bağımlılık derecesinin ve orjinal olasılığın bilinmesi haline aşağıdaki formül ile mümkündür.

⁴ Kyung S.Park, Human Reliability Analysis, ibid.

$$Prob\{n|n-1\} = (Bağ\%) 1.0 + (1 - Bağ\%)* Prob(n)$$

Örneğin yukarıdaki ağaç yapısında temel İHO $p\{b'\} = 0.001$ ve A ve B görevleri arasında orta düzeyde bağımlılık mevcut ise A görevinde başarısızlık olması halinde B görevinde de başarısız olması şartlı olasılığı:

$$Prob\{b^a\} = (0.15)1.0 + (0.85) 0.001 = 0.144$$

Başarılı olma şartlı olasılığı:

$$Prob\{b^a\} = 1 - Prob\{b^a\} = 0.856$$

IV.THERP Çıktıları ve Duyarlık Analizi:

THERP kullanılarak yapılan insan güvenilirliği analizi sonunda elde edilen çıktılar görev başarı ve arıza olasılıklarının tahminlerinden oluşacaktır. Bu çıktılar olasılıksal risk değerlendirmelerinde ve tasarım takas çalışmalarında kullanılabilir. İnsan güvenilirliği ağaç yapıları analiz işlemlerinde müşterek-nedenin insan hataları olması halinde olası müşterek-neden arıza olaylarının belirlenmesinde de katkısı olabilir.

İnsan performansı olasılıklarına ilişkin verilerin çoğundaki belirsizlikler nedeniyle farklı tahmin insan hata oranları, bağımlılık düzeyleri, stres düzeyleri hatta insan performansını etkileyen diğer faktörler ile bu faktörlerin sistem çıktıları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi açısından, duyarlılık analizinin yapımı yararlı olabilir. Bu amaçla genel olarak uygulanan iki tip analiz :

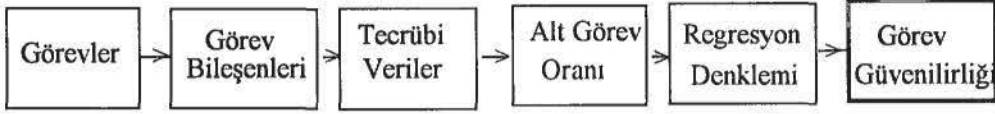
I. En kötü durum analizi: Kötümser İHO, örneğin 0.1

II. En iyi Durum analizi: İyimser İHO, örneğin 0.0001 tüm görevler için.

10.2. PONTECORVO METODU:

Görev performanslarının belirlenmesinde yararlı olan bu metod doğru güvenilirlik değer ve ilişkilerine sahip olmayan kesikli veya ayrık alt görevlerin güvenilirlik tahminleri ile ilgilidir. Toplam görev tahminleri bu tahminlerin birleştirilmesi ile elde edilir. İnsan makina kesişiminin sayısal olarak değerlendirilmesinde ilk tasarım safhasında bu metod uygulanır. Ayrıca bu metod tek başına çalışan sadece bir operatörün performansını belirlemede kullanılabilir.

Pontecorva yaklaşımı altı adımdan oluşur bu adımlar aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 10.2- Pontecorvo yaklaşımı işlem basamakları

• Birinci adımda, yerine getirilecek olan görevler belirlenir. Görevler; tam bir faaliyetin her görev ile yerine getirileceği şeklinde belirlenir.

• İkinci adımda her görevin alt görevleri (görevin tamamlanması için gerekli olan tüm görevler) belirlenir.

• Üçüncü adımda , veriler görevin icra edileceği çevre koşulları da göz önüne alınarak tecrübeye dayalı performans verileri toplanır. Bu verileri deneysel literatürlerden veya şirket yayınları gibi kaynaklardan temin mümkündür.

• Dördüncü aşamada alt görevler zorluk dereceleri veya hataya katkı seviyelerine bağlı olarak oranlanır. 10 değerli skala hataları küçükten büyüğe sıralamak için kullanılır.

• Beşinci adım alt görev güvenilirliğinin öngörümü ile ilgili olup bu amaçla oranlanmış veriler ve tecrübi verilere dayalı regresyon doğrusu, denklemi elde edilir.

• Son aşama görev olasılığının tesbiti olup görev olasılığı alt görevlerin çarpımı şeklinde elde edilir.

Bu yaklaşım tek başına hareket eden tek bireyin performansını belirlemek için kullanılmakta olup yedek personelin olması halinde görev güvenilirliği artacaktır. Eğer iki kişi bir görevi yerine getirmek için beraber çalışıyor ise beraber çalışma sonundaki güvenilirlik:

$$R_b = \left[\left\{ 1 - (1-r)^2 \right\} \cdot t_a + r \cdot t_u \right] / (t_a + t_u)$$

t_a : Yedek kişinin var olduğu zaman yüzdesi

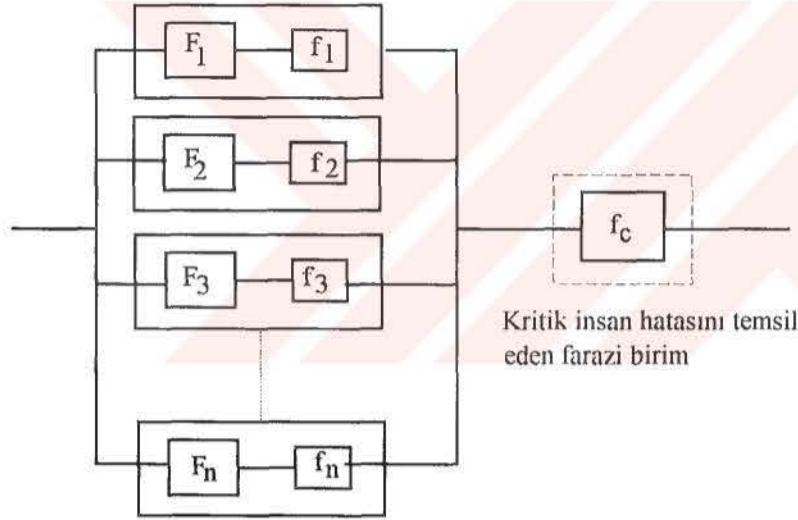
t_u : Yedek kişinin var olmadığı zaman yüzdesi olup $t_a + t_u = 1$ dir.

10.3. BLOK DİAGRAM METODU:

Paralel sistemlerin güvenilirliğinin hesaplanmasında kullanılan bu yöntemde tüm birimlerin aktif ve sistemin faal olması için en az bir birimin faal olması gerektiği kabul edilir. Eğer tüm birimler bozulur ise sistemin faaliyeti sona erer. Her bir birim donanım veya kritik olmayan insan hatası nedeniyle arızalanabilir. İnsan hataları

- Kritik
- Kritik olmayan

hatalar şeklinde ikiye ayrılır. Kritik hata sonunda tüm birimlerin faaliyeti sona ererken, kritik olmayan hata sonunda sadece bir birim arızalanır. Blok diagram metodunda birim arızalarının bağımsız olduğu kabul edilir. Örneğin, n birimden meydana gelen bir sistemin blok diagramı aşağıda görülmektedir.



Şekil 10.3-Kritik ve kritik olmayan insan elemanını içeren paralel sistem

Her birimin olasılıkları donanım ve insan hataları olmak üzere ikiye ayrılmış olup tüm sistem kritik insan hatasının oluşması halinde arıza göstermektedir. Kritik insan hatasını göstermek üzere varsayılan bir birim diagram içine yerleştirilmiştir. Paralel sistemi içeren bir odada insanın sebep olduğu yangını kritik insan hatası şeklinde değerlendirebiliriz. Paralel sistemin güvenilirliğini, R_p , aşağıdaki denklem ile ifade etmek mümkündür.

$$R_p = \left[1 - \prod_{i=1}^n \{1 - (1 - F_i)(1 - f_i)\} \right] (1 - f_c)$$

n : Aktif birim adedi

F_i : i. birimim donanım arıza olasılığı

f_i : i. birimin kritik olmayan insan hatası nedeniyle arıza oranı

i : 1,2,3,.....n

f_c : Kritik insan hatası nedeniyle paralel sistemin arıza olasılığıdır.

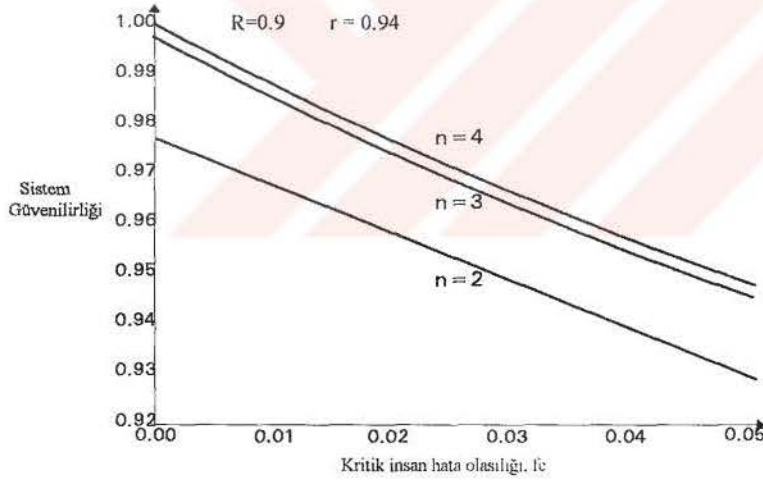
R_i : i. birimin donanım güvenilirliği ,

r_i : i. birimin kritik olmayan insan hatasına dayalı güvenilirliği ise :

$R_i = 1 - F_i$ ve $r_i = 1 - f_i$ olduğu için aynı eşitlik aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$R_p = \left[1 - (1 - Rr)^n \right] (1 - f_c)$$

Belirli birim donanım güvenilirliği, insan hatasına dayalı güvenilirliği, kritik insan hata olasılığı ve n değerine bağlı örnek grafik aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 10.4-Örnek Paralel Sistem Güvenilirlik Eğrisi

Grafikten de görülebileceği gibi kritik insan hata olasılığı artar ike azalmaktadır. Bağıl artış söz konusu olduğunda, üçüncü birimin ilavesi sonundaki güvenilirlik artışı dördüncü birimin ilavesine nazaran daha fazladır.

11.İNSAN GÜVENİLİRLİĞİNİN MARKOV MODELLEMESİ

Bağımsız arızalarda ve tamir modlarında diğer tekniklere nazaran daha kullanışlı olan Markov modellemesinin insan performansına da uyarlanması mümkündür olup eğer insan bileşenini içeren sistemin arıza ve tamir olasılıkları sabit ise Markov teniklerinin kullanımı daha da kolaylaşmaktadır. Bu bölümde operatör güvenilirliğinin normal, gerilimli ve telafi edilebilir hatalar sahip olması halinde davranışının Markov modelleri geliştirilmektedir.

Markov modellemede kullanılan kuram ve fksiyonlar özet olarak:

ı.Laplace Dönüşümü: Güvenilirlik analizinde ortaya çıkan diferansiyel denklem takımlarının çözümünde genellikle Laplace dönüşümü kullanılır.

Bir fksiyonun, $f(t)$, Laplace dönüşümü:

$$F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) \cdot dt \text{ olup}$$

s : Laplace dönüşüm değişkeni

t : Zaman

$f(t)$: t 'nin fksiyonu

ıı.Laplace Dönüşümü Son Değer Kuramı:

Bir fksiyonun durağan durum değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Tamir edilebilir sistemlerin analizinde kullanılan bu teorem gereği

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} [s \cdot f(s)]$$

s , Laplace dönüşüm değişkeni olup, $f(s)$ ise $f(t)$ fksiyonunun Laplace dönüşümüdür.

ııı.Arızaya Kadar Ortalama Zaman:

$$AKOZ = \int_0^{\infty} R_s(t) dt$$

AKOZ, arızaya kadar ortalama zaman değerini ifade etmekte olup $R_s(t)$ sistemin fksiyonu, t ise zamandır.

Alternatif olarak sistemin arızaya kadar ortalama zaman değerinin Laplace dönüşümlerinden yararlanarak hesaplanması da mümkündür.

$$AKOZ = \lim_{s \rightarrow 0} R(s) , R(s), \text{ sistem güvenilirliğinin Laplace dönüşümüdür.}$$

iv. Durum Uzayı Yaklaşımı

Markov metodunda ilk olarak durumlar numaralanır. Durum olasılıkları, ardından durağan durum olasılıkları frekans dengeleme yaklaşımı ile hesaplanır. ¹

- Hazır bulunamama veya arıza olasılığı: $P_f = \sum_{i \in F} P_i$

P_i : i durumunda olma olasılığı

F : Arıza durumlarının alt seti

- F alt setinde karşılaşılan arıza frekansı: $f_f = \sum_{i \in S-F} p_i \sum_{j \in F} \lambda_{ij}$

S : Sistem durum uzayı

λ_{ij} : i durumundan j durumuna geçişim olasılığı

- Arıza durumu ortalama süresi: $d_f = \frac{P_f}{f_f}$

11.1.NORMAL ÇALIŞMA ORTAMINDA OPERATÖR GÜVENİLİRLİĞİ

11.1.1.Normal Ortamda Zaman Sürekli Görev:

Çok basit şekilde çalışma ortamında, stres düzeyinde değişimler göz önüne alınmaksızın zaman sürekli bir görevi icra eden insanın model aşağıda görülmektedir.

İnsan performansı genel güvenilirlik fonksiyonu :

$$Re(t) = e^{-\int_0^t h_e(t) dt}$$

Bu güvenilirlik ifadesi insan hata oranının sabit veya sabit olmaması halleri içinde geçerlidir. Zaman sürekli görevlerde insan hata oranının, h_e , sabit olması hali için insan performansı güvenilirliğin Markov modeller yardımı ile çözümü istendiğinde:

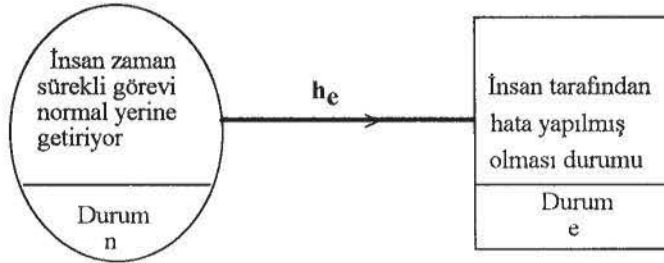
$h_e(t) = h_e$ olup yukarıdaki denklemde yerine konular ise

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t h_e dt\right) \quad \text{ve} \quad R(t) = \exp(-h_e t) \quad \text{elde edilir.}$$

¹ Chanan Singh & B.S:Dhillon, *Engineering Reliability New Techniques and Applications*, (New York:Jhon Waley & Sons, 1981), s.37

İnsan hatasına dayalı olarak Markov modelleme ile ilgili kabuller :

1. Tüm olaylar bağımsızdır
2. α durumundan, Δt sonlu zaman aralığında $\alpha+1$ durumuna geçişimin ortaya çıkma olasılığı, h_e geçişim olasılığı yani insan sabit hata oranı ise $\Delta t \cdot h_e$ ile elde edilir.
3. Δt zaman diliminde birden fazla oluşumun ortaya çıkma olasılığı ihmal edilebilir.



Şekil 11.1-Durum uzayı şeması

$P_n(t)$: t zamanında insanın zaman sürekli görevi normal olarak yerine getirme olasılığı

$P_e(t)$: t zamanında insanın hata yapma olasılığı

s : Laplace dönüşüm değişkeni ise

$P_n(t+\Delta t) = P_n(t)(1-h_e\Delta t)$ ve $P_e(t+\Delta t) = P_e(t) + P_n(t)h_e\Delta t$ elde edilir.

Eşitliklerin yeniden düzenlenmesi ve Δt sifıra giderken limitinin alınması ile:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_n(t+\Delta t) - P_n(t)}{\Delta t} = \frac{dP_n(t)}{dt} = -h_e P_n(t)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_e(t+\Delta t) - P_e(t)}{\Delta t} = \frac{dP_e(t)}{dt} = h_e P_n(t)$$

elde edilir.

$P_i(t)$, sistemin t zamanında i . durumda olma olasılığı ise $P_i(t)$ 'nin diferansiyelini aşağıda belirtildiği şekilde de bulmak mümkündür.².

² Michael Sharpe, *General Theory of Markov Processes*, Academic Press Inc. , Boston (1991)

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = (i. durumdan akış - i. duruma akış)$$

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_j \lambda_{ji} \cdot P_j - \sum_j \lambda_{ij} \cdot P_i$$

λ_{ij} : i . durumdan j . duruma geçiş olasılığı

λ_{ji} : j . durumdan i . duruma geçiş olasılığı

kuralı ile de yazmak mümkündür.

Denklemlerin Laplace dönüşümü yapılır ise:

$$sP_n(s) - P_n(0) + h_e P_n(s) = 0$$

$$sP_e(s) - P_e(0) = h_e \cdot P_n(s)$$

$t = 0$ anından $P_n(0) = 0$ ve $P_e(0) = 1$ olup eşitliklerin çözümü ile durum denklemleri elde edilir.

$$P_n(s) = \frac{1}{s + h_e} \quad \text{ve} \quad P_e(s) = \frac{h_e}{s(s + h_e)} \quad \text{elde edilir}$$

Ters Laplace dönüşümü ile t zamanında insanın normal faaliyet gösterme, n durumunda olma olasılığı $P_n(t)$ ve hata yapma, e durumunda olma olasılıkları $P_e(t)$, aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$L^{-1}\{P_n(s)\} = P_n(t) = e^{-\lambda t} \quad L^{-1}\{P_e(s)\} = P_e(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Güvenilirlik ise sistemin t süresince hatasız performans gösterme olasılığı olarak düşünülürse, bu sistemin "0" durumunda (hatasız performans) olma olasılığı olup insan performansı güvenilirliği, $R_s(t)$,

$$R_e(t) = P_n(t) = e^{-h_e t} \quad \text{şeklinde bulunur.}$$

Eşitlikten görüleceği gibi zaman (t) veya insan hata oranı arttıkça güvenilirlik değeri azalacaktır.

Eğer insan hata oranı (h_e) yerine λ sembolünü kullanırsak, insan hatasına kadar ortalama zaman değeri,³ $R(s)$: operatör güvenilirliğinin Laplace dönüşümü ise

$$\dot{HKOZ} = \lim_{s \rightarrow 0} R(s) = 1 / \lambda,$$

Operatörün arıza yoğunluk fonksiyonu:

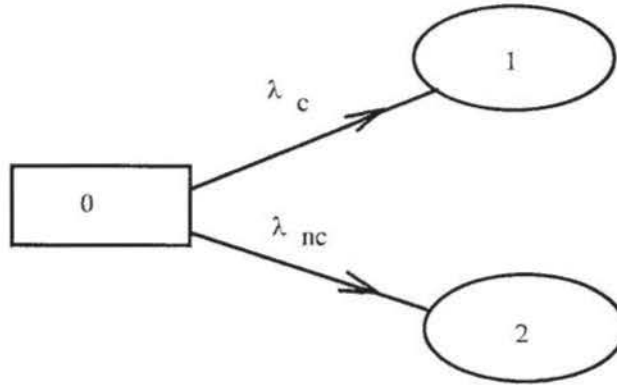
$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}$$

Zamana bağlı insan hata oranı fonksiyonu olasılık yoğunluk fonksiyonunun güvenilirlik fonksiyonuna bölünmesi ile aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda$$

11.1.2. Normal Çalışma Ortamında Kritik İnsan Hatası

Bu model, insanın yapmış olduğu hatanın kritik (sistemin tamamen arızaya girmesi) olup olmamasına bağlı olarak üç durumu içerecek şekilde yaratılmıştır. Modelde, insanın normal çalışma ortamında faaliyetini sürdürdüğü ve buna bağlı olarak stres düzeyinde değişim kabul edilmemektedir.



Şekil 11.2-Durum Uzay Diagramı

³ Balbir S.Dhillon, *System Reliability, Maintainability and Management*. (New York: Petrocelli Books, Inc., 1983)

Modelle ilgili semboller ve anlamları:

i	Durum:
i=0	Operatör görevini normal icra ediyor
i=1	Operatör kritik insan hatasına neden oldu
i=2	Operatör kritik olmayan insan hatasına neden oldu
$P_i(t)$	t anında i. durum olasılığı
λ_c	Sabit kritik insan arıza olasılığı
λ_{nc}	Sabit kritik olmayan insan arıza olasılığı
s	Laplace dönüşüm değişkeni

Sistemin geçişim diagramı ile ilgili diferansiyel denklemleri aşağıdaki şekilde yazmak mümkündür:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (\lambda_c + \lambda_{nc})P_0(t) = 0$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_c \cdot P_0(t)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{nc} \cdot P_0(t)$$

Faaliyet öncesi yani operatör çalışmaya başlamadan önce (t=0 anında), $P_0(0)=1$ ve $P_1(0)=0, P_2(0)=0$ olacaktır.

Laplace dönüşümü ile

$$sP_0(s) - P_0(0) + (\lambda_c + \lambda_{nc})P_0(s) = 0$$

$$sP_1(s) - P_1(0) = \lambda_c \cdot P_0(s)$$

$$sP_2(s) - P_2(0) = \lambda_{nc} \cdot P_0(s) \quad \text{elde edilir.}$$

$P_0(0)=1, P_1(0)=0, P_2(0)=0$ değerleri eşitliklerde yerlerine konulursa:

$$P_0(s) = \frac{1}{s + (\lambda_c + \lambda_{nc})} \quad \text{ve} \quad P_1(s) = \frac{\lambda_c}{s(s + \lambda_c + \lambda_{nc})}, \quad P_2(s) = \frac{\lambda_{nc}}{s(s + \lambda_c + \lambda_{nc})} \quad \text{elde}$$

edilir.

$\lambda_c + \lambda_{nc} = a$ olarak kabul edilip eşitliklerin Ters Laplace dönüşümü alınır ise :

$$P_0(t) = L^{-1}\{P_0(s)\} = L^{-1}\left\{\frac{1}{s+a}\right\} = e^{-at} = e^{-(\lambda_c + \lambda_{nc})t} \text{ elde edilir.}$$

$$P_1(t) = L^{-1}\{P_1(s)\} = L^{-1}\left\{\frac{\lambda_c}{s(s+a)}\right\} \text{ fonksiyon basit kesirlere ayrılır ise:}$$

$$\frac{\lambda_c}{s(s+a)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s+a} \text{ paylardaki bilinmeyenler, pratik olarak kapatma yöntemiyle}$$

paydanın köklerinin bulunup eşitliğin sol tarafında ilgili parametrenin kapatılıp yerine konulmasıyla:

$$s=0 \rightarrow A = \frac{\lambda_c}{a}, \quad s=-a \rightarrow B = \frac{\lambda_c}{-a} \text{ elde edilir.}$$

$$P_1(t) = L^{-1}\left\{\frac{\lambda_c}{a} \cdot \frac{1}{s} + \frac{\lambda_c}{-a} \cdot \frac{1}{s+a}\right\} = \frac{\lambda_c}{a} \cdot 1 - \frac{\lambda_c}{a} \cdot e^{-at} \rightarrow P_1(t) = \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \lambda_{nc}} [1 - e^{-(\lambda_c + \lambda_{nc})t}]$$

elde edilir.

$$P_2(t) = L^{-1}\{P_2(s)\} = L^{-1}\left\{\frac{\lambda_{nc}}{s(s+a)}\right\} \text{ fonksiyon basit kesirlere ayrılır ise:}$$

$$\frac{\lambda_{nc}}{s(s+a)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s+a} \text{ paylardaki bilinmeyenler, kapatma yöntemiyle paydanın}$$

köklerinin bulunup eşitliğin sol tarafında ilgili parametrenin kapatılıp yerine konulmasıyla:

$$s=0 \rightarrow A = \frac{\lambda_{nc}}{a}, \quad s=-a \rightarrow B = \frac{\lambda_{nc}}{-a} \text{ elde edilir.}$$

$$P_2(t) = L^{-1}\left\{\frac{\lambda_{nc}}{a} \cdot \frac{1}{s} + \frac{\lambda_{nc}}{-a} \cdot \frac{1}{s+a}\right\} = \frac{\lambda_{nc}}{a} \cdot 1 - \frac{\lambda_{nc}}{a} \cdot e^{-at} \rightarrow P_2(t) = \frac{\lambda_{nc}}{\lambda_c + \lambda_{nc}} [1 - e^{-(\lambda_c + \lambda_{nc})t}]$$

elde edilir.

Sıfır durumunda (hatasız performans) sistem güvenilir konumda olacağı için operatör güvenilirliği:

$R(t) = P_0(t) = e^{-(\lambda_c + \lambda_{nc})t}$ eşitliği ile ifade edilir. Kritik insan hatasının ortaya çıkma olasılığı ise sistemin 2 durumunda olma olasılığına yani $P_2(t)$ 'ye eşittir.

İnsan hatasına kadar ortalama zaman değeri, $R(s)$: Operatör güvenilirliğinin Laplace dönüşümü ise

$$\text{İHKOZ} = \lim_{s \rightarrow 0} R(s) = 1 / (\lambda_c + \lambda_{nc}) \text{ şeklinde hesap edilir.}$$

Operatörün arıza yoğunluk fonksiyonu:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = (\lambda_c + \lambda_{nc})e^{-(\lambda_c + \lambda_{nc})t}$$

Zamana bağlı insan hata oranı fonksiyonu olasılık yoğunluk fonksiyonunun güvenilirlik fonksiyonuna bölünmesi ile aşağıdaki şekilde hesaplanır.

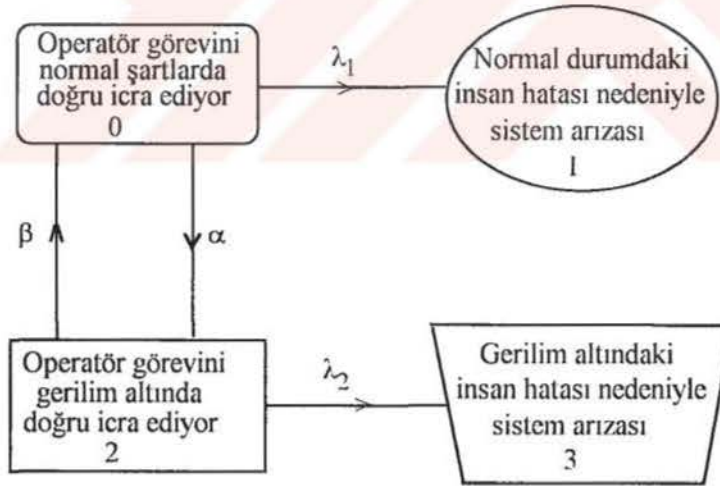
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda_c + \lambda_{nc}$$

11.2.GERİLİM ALTINDA OPERATÖR GÜVENİLİRLİĞİ

Bu bölümde çeşitli gerilim düzeylerinde zaman sürekli görev icra eden insan operatörünün güvenilirlik analizi ile ilgili modeller üzerinde durulacaktır.

11.2.1.Gerilim Ortamında Giderilemeyen İnsan Hatası:

Bu model dört durumlu Markov yapı özelliğini taşımakta olup durum-uzay diagramı aşağıda görülmektedir. Zaman sürekli görev icra eden operatör normal ve gerilim olarak ifade edilen iki durum arasında dalgalanma gösterir. Normal şartlarda veya gerilim altında faalite gösteren insanın hata yapması halinde sistem arızası ortaya çıkar.



Şekil 11.2-Değişen gerilim altında insan operatörü:

Model ile ilgili varsayımlar:

- 1.Hatalar istatistiksel olarak bağımsızdır.
- 2.İnsan hata oranları sabittir.

3. İnsan zaman sürekli bir görevi icra etmektedir.

4. Operatörün içinde bulunduğu şartlarının değişim oranları (normal durumdan gerilim durumuna veya gerilim durumundan normal duruma) sabittir.

λ_1 : 0 durumunda insanın sabit hata oranı

λ_2 : 2 durumunda insanın sabit hata oranı

α : Normal durumdan gerilim durumuna geçişim oranı

β : Gerilim durumundan normal duruman geçişim oranı

s : Laplace dönüşüm değişkeni

$P_i(t)$: t zamanında i'nci durumda olma olasılığı

i: 0,1,2,3.

Modelle ilgili durum denklemleri

$$\frac{P_0(t)}{dt} + \lambda_1 P_0(t) + \alpha P_0(t) = \beta \cdot P_2(t)$$

$$\frac{P_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0(t)$$

$$\frac{P_2(t)}{dt} + \lambda_2 P_2(t) + \beta P_2(t) = \alpha \cdot P_0(t)$$

$$\frac{P_3(t)}{dt} = \lambda_{21} P_2(t)$$

t=0 anında $P_0(0) = 1$ ve $P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = 0$ olup Laplace dönüşüm teknikleri ile durum olasılıklarının bulunması mümkündür. İnsan operatörünün güvenilirliği sistemin 0 veya 2 durumlarında bulunmalarına bağlı olup

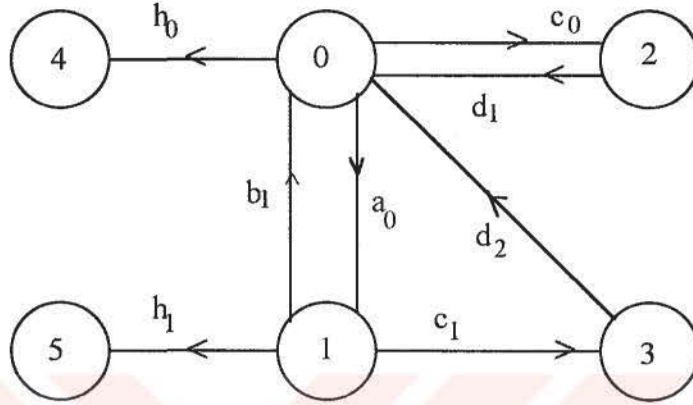
$R(t) = P_0(t) + P_2(t)$ denklemi ile hesaplanır.

İnsan hatasına kadar ortalama zaman ise klasik olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned} IHKOZ &= \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} [P_0(t) + P_2(t)] dt \\ &= (\lambda_2 + \alpha + \beta) / (\lambda_1(\lambda_2 + \beta) + \alpha\lambda_2) \end{aligned}$$

11.2.2. Gerilim Ortamında Telafi Edilebilir İnsan Hatası:

Bu modelde, hatanın kendince telafisi mümkün olan, farklı gerilim düzeylerinde görevini icra eden operatörün güvenilirlik analizine yer verilmektedir. Aşağıda gerilimli ve normal stres düzeylerinde operatörün davranışının Markov modellemesi görülmektedir.



Şekil 11.4-Durum uzay diagramı

Model ile ilgili varsayımlar:

1. Arızalar istatistiksel olarak bağımsızdır
2. Stres düzeyleri: 0, 1
3. Kendince düzeltilebilen veya düzeltilemeyen insan hatası tamir oranları sabittir.
4. Bir gerilim düzeyinden diğerine geçişim oranları sabittir.
5. Operatörün normal gerilimden i . düzey, ($i=1$), gerilime geçişim oranı sabittir.
6. Kendince düzeltilebilen hata oranı özelliği taşıyan tamir edilmiş sistem normal durumda yeni bir sistem gibi faaliyete başlar.

Notasyonlar:

- 0 : Başlangıç durumu ($t = 0$), operatör faaliyetini normal durumda doğru olarak icra ediyor
- 1 : Kişi stres altında görevini normal icra ediyor.
- 2,3 : Düzeltilebilir insan hatası nedeniyle sistem arızalı
- 4,5 : Düzeltilemez insan hatası nedeniyle sistem arızalı, ($k = 4,5$)

- a_0 : 0. durumdan 1. duruma geçişim oranı
 b_1 : 1. durumdan 0. duruma geçişim oranı
 c_0 : 0. durumda düzeltilebilir insan arıza oranı
 c_1 : 1. durumda düzeltilebilir insan arıza oranı
 d_1 : 0 stres düzeyinde sistem arıza durumundan 0 durumuna insan hatası tamir oranı
 d_2 : 1 stres düzeyinde sistem arıza durumundan 0 durumuna insan hatası tamir oranı
 h_0 : 0 stres düzeyinde düzeltilemez insan hata oranı
 h_1 : 1 stres düzeyinde düzeltilemez insan hata oranı
 $P_0(t)$: t zamanında sistemin 0 durumunda olma olasılığı
 $R(s)$: Operatör güvenilirliği Laplace dönüşümü
 $\bar{I}HKOZ$: İnsan hatasına kadar ortalama zaman

Sistem ile ilgili durum denklemleri:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (a_0 + c_0 + h_0)P_0(t) = b_1P_1(t) + d_1P_2(t) + d_2P_3(t)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + (b_1 + c_1 + h_1)P_1(t) = a_0P_0(t)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} + d_1P_2(t) = c_0P_0(t)$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} + d_2P_3(t) = c_1P_1(t)$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = h_0P_0(t)$$

$$\frac{dP_5(t)}{dt} = h_1P_1(t)$$

t = 0 anında $P_0(t) = 1$ olup diğer durum olasılıklarının değeri sıfırdır. Yukarıda verilen denklemlerin Laplace dönüşümleri ise :

$$s.P_0(s) - P_0(0) + (a_0 + c_0 + h_0)P_0(s) = b_1P_1(s) + d_1P_2(s) + d_2P_3(s)$$

$$s.P_1(s) - P_1(0) + (b_1 + c_1 + h_1)P_1(s) = a_0P_0(s)$$

$$s.P_2(s) - P_2(0) + d_1P_2(s) = c_0P_0(s)$$

$$s.P_3(s) - P_3(0) + d_2P_3(s) = c_1P_1(s)$$

$$s.P_4(s) - P_4(0) = h_0P_0(s)$$

$$s.P_5(s) - P_5(0) = h_1P_1(s)$$

$t=0$ anında $P_0(t)=1$, $P_1(t) = P_2(t) = P_3(t) = P_4(t) = P_5(t) = 0$ değerleri yerlerine konularak yukarıdaki denklemler yeniden düzenlenebilir.

Laplace dönüşümleri ile operatörün güvenilirliği, sistemin arızalı olmadığı 0 ve 1 durumlarında bulunması ile ifade edilir:

$$R(s) = \sum_{i=0}^N P_i(s), N=1$$

İnsan hatasına kadar ortalama arıza zamanı:

$\dot{I}HKOZ = \lim_{s \rightarrow 0} R(s)$ ile hesaplanabilir.

12.SİSTEM GÜVENİLİRLİKLERİNİN İNSAN HATALARI İLE MODELLENMESİ

Genelde sistem güvenilirlikleri çalışmalarında donanım arızaları ile ilgilenilmiş ve insan hataları ihmal edilmiştir. Fakat, günümüzde insan-makina etkileşimindeki artış, insan menşeyli arızalarda da artışa sebep olmakta, insan hatasının ihmal edilmemesi gerekliliğini gözler önüne sermektedir.

İnsan, mühendislik sistemleri ile çeşitli şekillerde etkileşim içinde olup bu etkileşimleri nükleer güç santrallerinde, bilgi işlem merkezlerinde, bir uçağın pilot kabini v.b. yerlerde gözlemek mümkündür. Güvenilirlik mühendisliğinde önemli bir yeri olan insan hatalarının tümü sistem arızası için sebep teşkil etmeyebilirken, bazıları diğerlerine nazaran çok daha önemli arızalara neden olabilir.

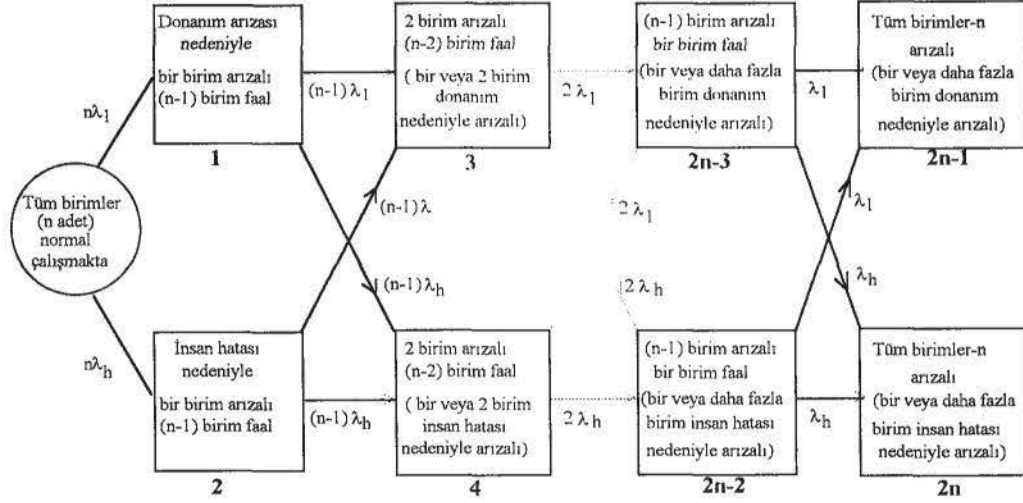
Bazı araştırmalara göre¹ sistem arızalarının yaklaşık %20-30 kadarı doğrudan veya dolaylı olarak insan hataları ile ilişkilidir. Mühendislik sistemlerinde insan hatası; iş ortamının yetersizlikleri, yetersiz eğitim veya ehliyet düzeyi, bakım hataları, aletlerin yanlış yorumlanması, hatalı davranışlar gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır.

Bu nedenle insan hataları nedeniyle sistem arıza olasılıkları hayati bir parametre haline gelmiş olup gerçekçi bir sistem güvenilirliği analiz çalışmalarının insan ve donanım güvenilirliklerinin içermesi gerekliliği düşüncesiyle bu bölümde insan ve donanıma dayalı sistem analizlerine yer verilmektedir.

İnsan hatalarını içeren çeşitli tipteki mühendislik sistemlerinin güvenilirlik ve hazır bulunuşluluk analizi modelleri Markov tekniği kullanılarak oluşturulacaktır. Parametrelere keyfi değerler verilerek elde edilecek veriler güvenilirliğin çeşitli parametrelere bağlı olarak gözlenmesi açısından yararlı olabilir.

¹ D.Meister, "The Problem of human initiated failures", Eight National Symposium on Reliability and Quality Control, (1962)

12.1. İKİ BİRİMLİ AKTİF PARALEL SİSTEM



Şekil 12.1-n-birimlik paralel sistem geçişim diagramı ²

Yukarıdaki şekilde n birimlik paralel sistemin geçiş diagramı görülmektedir. Aynı diagramın çeşitli eleman adetleri için kullanımı mümkündür. Sistemin güvenilirlik değerlendirmeleri Markov modelleme ve teknikleri ile yapılacaktır. Bu amaçla; öncelikle durum uzay diagramlarının veya geçişim matrislerinin belirlenmesi, ardından durum denklemlerinin yazımı ve çözümü şeklinde çalışma sürdürülecektir.

Paralel sistemi oluşturan her birim donanım arızası veya insan hatası nedeniyle arızalanabilir. Tüm modeller için aşağıdaki varsayımlar geçerlidir.

1. Paralel sistemi oluşturan tüm birimler birbirinin aynıdır.
2. Arızalar istatistiksel olarak bağımsızdır.
3. Her birimin donanım arıza ve insan hata oranları sabittir.
4. Arızalanan birimler tamir edilemez.
5. Her birimin insan ve donanım arıza oranları ayrılabilir.
6. Sistemin oluşturan tüm birimler aynı anda faaliyete geçmektedir.
7. Kutuların altında bulunan numaralar ise durum numaraları aynıdır.

²Rayapati N.S., Dhillon B.S., "Reliability analysis of non-maintained parallel systems subject to hardware failure and human error", Microelectronic and Reliability . C.25(1), ss.111-122, 1985

- n: Paralel sistemi oluşturan birim adedi
 $P_i(t)$: t zamanında sistemin i durumunda olma olasılığı
 λ_1 : Bir birimin sabit donanım arıza oranı
 λ_h : Bir birimin sabit insan hata oranı
s : Laplace dönüşüm değişkeni
i : 1,2,3,.....n

Yukarıda sunulan şekil üzerinde eleman adedinin iki olması halinde iki birimlik paralel sistemin durum şeması ortaya çıkar. Sistemi oluşturan durumlar:

- 0: İki biriminde faal olması
1. Bir birimin donanım arızası nedeniyle faal olmayıp diğerinin faal olması
2. İki birimin de donanım arızası nedeniyle faal olmaması
3. Bir birimin insan hatası nedeniyle faal olmayıp, diğerinin faal olması
4. Her iki birimin insan hatası nedeniyle faal olmaması

Birimlerde tamir özelliği olmayıp her durum ile ilgili diferansiyel denklemler Markov tekniğinden yararlanılarak yazılırsa:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + 2\lambda_1 P_0(t) + \lambda_h P_0(t) = 0$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + \lambda_1 P_1(t) + \lambda_h P_1(t) = P_0(t)2\lambda_1$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} + \lambda_1 P_2(t) + \lambda_h P_2(t) = P_0(t)2\lambda_h$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = P_1(t)\lambda_1 + P_2(t)\lambda_1$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = P_1(t)\lambda_h + P_2(t)\lambda_h$$

t = 0 anında, durum olasılıklarının hepsinin değeri sıfırdır. Laplace dönüşümü yardımıyla yukarıdaki denklemlerin çözümüyle durum olasılık denklemleri:

$$\begin{aligned}
P_0(t) &= e^{-2At} \quad \text{ve } A = \lambda_1 + \lambda_h \\
P_1(t) &= \lambda_1 B \quad \text{ve } B = (2/A)(e^{-At} - e^{At}) \\
P_2(t) &= \lambda_h B \\
P_3(t) &= \lambda_1 C \quad \text{ve } C = (1/A)(1 - e^{-At})^2 \\
P_4(t) &= \lambda_h C
\end{aligned}$$

şeklinde bulunur. İki birimlik sistemin güvenilirliği, sistemin en az bir elemanın, paralel olma özelliğinden dolayı sistemin faal olduğu: 0, 1 ve 2 numaralı durumlarda bulunması olup

$$\begin{aligned}
R(t) &= P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) \\
&= 1 - (1 - e^{-At})^2
\end{aligned}$$

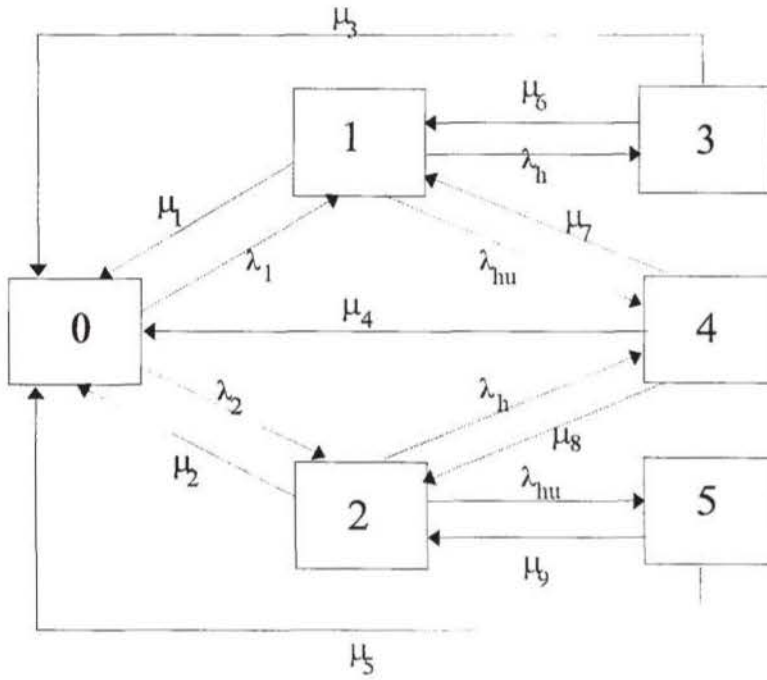
formülü ile bulunur. Sistemin arızaya kadar ortalama zaman (AKOZ) değeri ise:

$$AKOZ = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - (1 - e^{-At})^2) dt = \frac{1}{A} + \frac{1}{2A}$$

ifadesi ile bulunur.

12.2. TAMİR EDİLEBİLİR İKİ ELEMANLI PARALEL SİSTEM

Sistem birbirinden bağımsız ve birbirinin aynı iki birimden meydana gelmektedir. Her iki bir aynı anda faaliyet göstermektedir. Her birim, donanım arızası veya insan hataları nedeniyle arızalanabilir. Bu bölümde, Markov modellemesine yer verilen, birbirinde bağımsız, tamir edilebilme özelliğine sahip her iki elemanın aynı anda faaliyet gösterdiği iki elemanlı paralel bir sistemin arızalanabilmesi için her iki elemanın da arızalanması gerekmektedir. Arızalanan eleman tamir edilir edilmez tekrar sisteme dahil edilir. Sistem durum diagramı aşağıda görülmektedir.



Şekil 12.2-Tamir edilebilir iki elemanlı paralel sistem

Matematiksel model ile ilgili semboller:

- j : Durum indisi
- 0 : Her iki eleman normal çalışmakta
- 1 : Bir eleman donanım nedeniyle arızalı diğeri çalışıyor
- 2 : Bir eleman insan hatası nedeniyle arızalı diğeri normal çalışıyor
- 3 : Her iki eleman donanım nedeniyle arızalı
- 4 : Her iki eleman arızalı- biri donanım diğeri insan hatası nedeniyle
- 5 : Her iki eleman insan hatası nedeniyle arızalı
- $P_j(t)$: t zamanında sistemin j durumunda olma olasılığı
- λ_h : Sabit donanım arıza oranı. 0 durumunda her iki eleman da paralel ve faal olduğundan herhangi bir elemanın donanım arızası nedeniyle arızalanmasına neden olan arıza oranı: $\lambda_1=2\lambda_h$
- λ_{hu} : Sabit insan hata oranı. 0 durumunda her iki eleman da paralel ve faal olduğundan herhangi bir elemanın insan hatası nedeniyle arızalanmasına neden olan arıza oranı: $\lambda_2=2\lambda_{hu}$
- μ_j : j durumundan 0 durumuna sabit tamir oranı ($j:1,2,3,4,5$)

3 ve 4 durumundan 1 durumuna sabit tamir oranı (j:6,7)

4 ve 5 durumundan 2 durumuna sabit tamir oran (j:8,9)

S Laplace transfer değişkeni

Yukarıda durum diagramı verilen sistem ile ilgili varsayımlar:

1. Arızalar istatistiksel olarak bağımsızdır
2. Donanım arıza ve insan hata oranları bağımsızdır
3. Eleman ve sistem tamir oranları sabittir.
4. Tamir edilen eleman yenisi ile aynı özellikleri taşır
5. Sistemi oluşturan tüm elemanlar birbirinin aynısıdır.

Sistemle ilgili diferansiyel denklemler:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) = P_1(t)\mu_1 + P_2(t)\mu_2 + P_3(t)\mu_3 + P_4(t)\mu_4 + P_5(t)\mu_5$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + (\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_1)P_1(t) = P_0(t)\lambda_1 + P_3(t)\mu_6 + P_4(t)\mu_7$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} + (\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_2)P_2(t) = P_1(t)\lambda_2 + P_4(t)\mu_8 + P_5(t)\mu_9$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} + (\mu_3 + \mu_6)P_3(t) = P_1(t)\lambda_h$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} + (\mu_4 + \mu_7 + \mu_8)P_4(t) = P_1(t)\lambda_{hu} + P_2(t)\lambda_h$$

$$\frac{dP_5(t)}{dt} + (\mu_5 + \mu_9)P_5(t) = P_2(t)\lambda_{hu}$$

Tamir edilebilme özelliği taşıyan bu sistemde arızaya kadar ortalama zaman değeri:

$$AKOZ_T = \lim_{s \rightarrow 0} R(s)$$

R(s) sistem güvenilirlik fonksiyonunun Laplace dönüşümüdür. Sistemin faal olması için en az bir elamanının faal olması gereken 0, 1 ve 2 durumlarının olasılıklarına bağlıdır.

Yukarıdaki eşitliklerde $j=3,4,5,6,7,8,9$ değerleri için μ_j değerlerinin yerine sıfır koyarak Laplace dönüşümü yapıldıktan sonra $P_0(S)$, $P_1(S)$, $P_2(S)$ değerleri dolayısıyla $R(s)$ hesaplandığında:

$$A_{11} = (\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_1)(\lambda_2 + \lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_2) + \lambda_1(\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_2)$$

$$A_{12} = (\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_1)((\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_2) - \lambda_2\mu_2) - \lambda_1\mu_1(\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_2)$$

$AKOZ = A_{11} / A_{12}$ ifadesi ile bulunur.

Eğer tamir oranları olan μ_1 ve μ_2 değerleri yerine sıfır konulur ise tamir özelliği olmayan iki elemanlı paralel sistemim AKOZ değerinin aynısı bulunur.

İki elemanlı paralel bir sistemin hazır bulunmuşluğu, sistemin en az bir elemanının faal olmasını gerektiren durumların durağan-durum olasılıklarının hesaplanmasını gerektirir. Durağan-durum şartı, belirli bir durumda zamana bağlı olmaksızın bulunma şartıdır.

$t = 0$ anında $P_0(0)=1$ olup diğer durum olasılıklarının değeri sıfırdır. Durağan durum halinde değişimin olmayacağı esastan hareketle, sisteminin durağan durum olasılıklarının hesaplanabilmesi için yukarıdaki deferasiyel denklemlerde türevlerin sıfıra eşitlenmesi ve durum olasılıklarının toplamının bir olduğu göz önüne alınarak çözümlenmesi ile bulunabilir. Sistem durum olasılıklarının zamana bağlı olmaksızın ifadesi olan durağan durum olasılıkları:

$$P_0 = 1 + [A_7(1 + A_1 + A_2\lambda_{hu}) + A_8(1 + A_3 + A_2\lambda_h)]^{-1}$$

ve

$$A_1 = \lambda_h / (\mu_3 + \mu_6), \quad A_2 = 1 / (\mu_4 + \mu_7 + \mu_8)$$

$$A_3 = \lambda_{hu} / (\mu_5 + \mu_9), \quad A_4 = \lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_2 - \lambda_h\mu_8A_2 - \mu_9 / A_3,$$

$$A_5 = \lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_1 - \mu_6A_1 - \lambda_{hu}\mu_7A_2, \quad A_6 = \lambda_h\mu_7A_2 / A_4$$

$$A_7 = (\lambda_1 + \lambda_2A_6) / (A_5 - \lambda_{hu}\mu_8A_2A_6), \quad A_8 = (\lambda_2 + \lambda_{hu}\mu_8A_2A_7) / A_4$$

$$P_1 = P_0A_7, \quad P_2 = P_0A_8, \quad P_3 = P_0A_1A_7$$

$$P_4 = P_0A_2(\lambda_{hu}A_7 + \lambda_hA_8), \quad P_5 = P_0A_3A_8$$

0, 1 ve 2 durumlarında elamanlardan en az biri faal olup sistem faaliyetini sürdürebilecek pozisyonda olduğundan, sistemin duragan durum hazır bulunuşluluğu :

$$AV_{ss} = P_0 + P_1 + P_2 \quad \text{formülü ile hesaplanabilir.}$$

Eğer çeşitli μ değerleri için durağan durum hazır bulunuşlukları hesaplanıp grafik ile ifade edildiğinde λ_{hu} ve λ_h değerleri arttıkça durağan durumu hazır bulunuşluluk değerlerinin azaldığı gözlenebilir.

İnsan hatası nedeniyle en az bir elemanın arızalanmış olmasının durağan durum olasılığı:

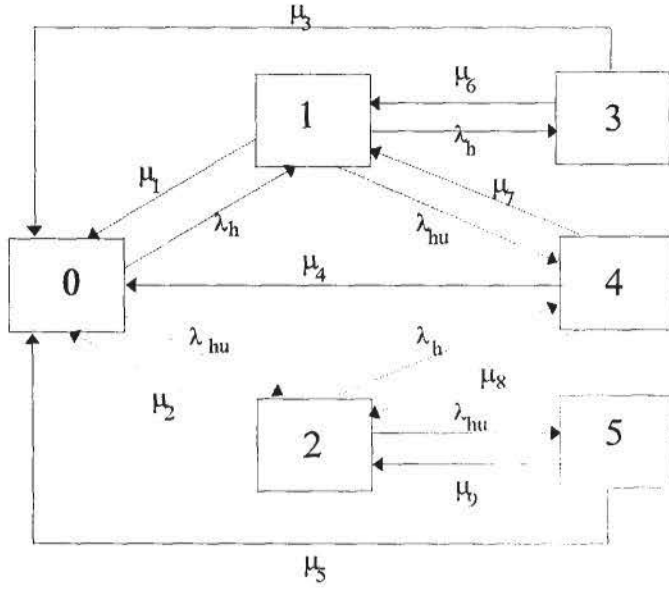
$$P_{hu} = P_2 + P_4 + P_5$$

Donanım arızası nedeniyle en az bir elemanın arızalanmış olmasının durağan durum olasılığı:

$$P_h = P_1 + P_3 + P_4$$

12.3.AYNI TİP İKİ ELEMANLI YEDEKLİ SİSTEM

Bu bölümde birbirinin aynı iki elemandan oluşan yedek sistemin Markov modellenmesine yer verilecektir. Başlangıçta, $t=0$ anında, bir eleman çalışmaya başlar ve diğeri yedek konumdadır. Yedek konumda olan elemanın arıza oranı sıfırdır. Çalışan eleman insan veya donanım arızası nedeniyle bozulabilir. Çalışan eleman bozulur bozulmaz yedek eleman devreye girer ve arızalanan eleman tamirden sonra tekrar eski moduna döner. Bu modelin durum uzay durum diagramı aşağıda görülmektedir.



Şekil 12.3-Birbirini aynı iki elemanlı yedekli sistem.

Durum olasılık denklemlerini oluşturmak için kullanılan notasyonlar:

- j : Durum indisi
- $j=0$: Bir eleman çalışıyor diğeri yedek
- $j=1$: Bir eleman donanım nedeniyle arızalı diğeri çalışıyor
- $j=2$: Bir eleman insan hatası nedeniyle arızalı diğeri normal çalışıyor
- $j=3$: Her iki eleman donanım nedeniyle arızalı
- $j=4$: Her iki eleman arızalı- biri donanım diğeri insan hatası nedeniyle
- $j=5$: Her iki eleman insan hatası nedeniyle arızalı
- $P_j(t)$: t zamanında sistemin j durumunda olma olasılığı
- λ_h : Sabit donanım arıza oranı
- λ_{hu} : Sabit insan hata oranı
- μ_j : j . sabit tamir oranı
- $j=1$: 1 durumundan 0 durumuna
- $j=2$: 2 durumundan 0 durumuna
- $j=3$: 3 durumundan 0 durumuna
- $j=4$: 4 durumundan 0 durumuna
- $j=5$: 5 durumundan 0 durumuna

- j=6 : 3 durumundan 1 durumuna
j=7 : 4 durumundan 1 durumuna
j=8 : 4 durumundan 2 durumuna
j=0 : 5 durumundan 2 durumuna
S Laplace transfer değişkeni

Yukarıda durum diagramı verilen sistem ile ilgili varsayımlar:

1. Tamir edilen eleman yenisi ile aynı özellikleri taşır
2. Arızalar istatistiksel olarak bağımsızdır
3. Sistemi oluşturan tüm elemanlar birbirinin aynısıdır.
4. Eleman ve sistem tamir oranları sabittir.
5. Donanım arıza ve insan hata oranları sabittir.
6. Anahtar mekanizması mükemmeldir.

Sistemle ilgili diferansiyel denklemler:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (\lambda_h + \lambda_{nu})P_0(t) = P_1(t)\mu_1 + P_2(t)\mu_2 + P_3(t)\mu_3 + P_4(t)\mu_4 + P_5(t)\mu_5$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + (\lambda_h + \lambda_{nu} + \mu_1)P_1(t) = P_0(t)\lambda_h + P_3(t)\mu_6 + P_4(t)\mu_7$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} + (\lambda_h + \lambda_{nu} + \mu_2)P_2(t) = P_0(t)\lambda_{nu} + P_4(t)\mu_8 + P_5(t)\mu_9$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} + (\mu_3 + \mu_6)P_3(t) = P_1(t)\lambda_h$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} + (\mu_4 + \mu_7 + \mu_8)P_4(t) = P_1(t)\lambda_{nu} + P_2(t)\lambda_h$$

$$\frac{dP_5(t)}{dt} + (\mu_5 + \mu_9)P_5(t) = P_2(t)\lambda_{nu}$$

t = 0 anında P₀(0)=1 olup diğer durum olasılıklarının değeri sıfırdır. Yukarıdaki diferansiyel denklemlerde türevlerin sıfıra eşitlenmesi ve toplamalarının bir olduğu,

$\sum_{i=0}^5 P_i =$, göz önüne alınarak sistem durum olasılıklarının zamana bağlı olmaksızın

ifadesi olan durağan durum olasılıkları:

$$P_0 = 1 + [A_7(1 + A_1 + A_2\lambda_{hu}) + A_8(1 + A_3 + A_2\lambda_h)]^{-1}$$

ve

$$A_1 = \lambda_h / (\mu_3 + \mu_6), \quad A_2 = 1 / (\mu_4 + \mu_7 + \mu_8)$$

$$A_3 = \lambda_{hu} / (\mu_5 + \mu_9), \quad A_4 = \lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_2 - \lambda_h\mu_8 A_2 - \mu_9 A_3$$

$$A_5 = \lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_1 - \mu_6 A_1 - \lambda_{hu}\mu_7 A_2, \quad A_6 = \lambda_h\mu_7 A_2 / A_4$$

$$A_7 = (\lambda_h + \lambda_{hu} A_6) / (A_5 - \lambda_{hu}\mu_8 A_2 A_6), \quad A_8 = \lambda_{hu}(1 + \mu_8 A_2 A_7) / A_4$$

$$P_1 = P_0 A_7, \quad P_2 = P_0 A_8, \quad P_3 = P_0 A_1 A_7$$

$$P_4 = P_0 A_2 (\lambda_{hu} A_7 + \lambda_h A_8), \quad P_5 = P_0 A_3 A_8$$

0, 1 ve 2 durumlarında elamanlardan en az biri faal olup sistem faaliyetini sürdürebilecek pozisyonda olduğundan, sistemin durağan durum hazır bulunmuşluğu :

$$AV_{ss} = P_0 + P_1 + P_2 \quad \text{formülü ile hesaplanabilir.}$$

Eğer çeşitli μ değerleri için durağan durum hazır bulunmuşlukları hesaplanıp grafik ile ifade edildiğinde λ_{hu} ve λ_h değerleri arttıkça durağan durumu hazır bulunmuşluk değerlerinin azaldığı gözlenebilir.

İnsan hatası nedeniyle en az bir elemanın arızalanmış olmasının durağan durum olasılığı:

$$P_{hu} = P_2 + P_4 + P_5$$

Donanım arızası nedeniyle en az bir elemanın arızalanmış olmasının durağan durum olasılığı:

$$P_h = P_1 + P_3 + P_4$$

Tamir edilebilme özelliği taşıyan bu sistemde arızaya kadar ortalama zaman değeri:

$$AKOZ_T = \lim_{s \rightarrow 0} R(s)$$

R(s) sistem güvenilirlik fonksiyonunun Laplace dönüşümüdür. Sistemin faal olması için en az bir elamanının faal olması gereken 0, 1 ve 2 durumlarının olasılıklarına bağlıdır.

Yukarıdaki eşitliklerde j=3,4,5,6,7,8,9 değerleri için μ_j değerlerinin yerine sıfır koyarak Laplace dönüşümü yapıldıktan sonra $P_0(S)$, $P_1(S)$, $P_2(S)$ değerleri dolayısıyla R(s) hesaplandıktan sonra tamir imkanı ile AKOZ değeri:

$$AKOZ_T = \lim_{s \rightarrow 0} R(S) = \lim_{s \rightarrow 0} \{P_0(S) + P_1(S) + P_2(S)\}$$

$AKOZ_T = A_9 / A_{10}$ ifadesi ile bulunur.

$$A_9 = (\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_1)(2\lambda_{hu} + \lambda_h + \mu_2) + \lambda_h(\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_2)$$

$$A_{10} = (\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_1)((\lambda_h + \lambda_{hu})(\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_2) - \lambda_{hu}\mu_2) - \lambda_h\mu_1(\lambda_h + \lambda_{hu} + \mu_2)$$

Eğer tamir oranları olan μ_1 ve μ_2 değerleri yerine sıfır konular ise tamir özelliği olmayan iki elemanlı paralel sistemim AKOZ değerinin aynısı bulunur.

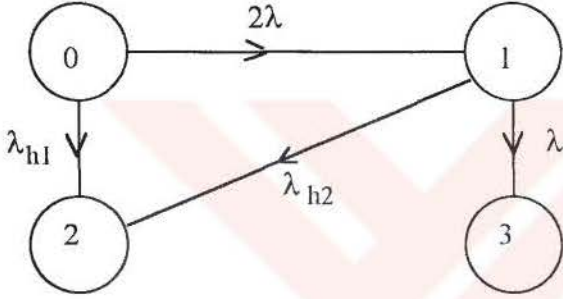
12.4.KRİTİK İNSAN HATASI İÇEREN SİSTEMLERİN ANALİZİ

Tüm insan hataları mutlaka sistem arızasına neden olacaktır diye bir kural yoktur. Hatta bazı insan hataları diğerlerine nazaran daha oneli arızalara neden olabilir. Bu nedenle önemli arızalar neden olan insan hataları **kritik** olarak vasıflandırılır.³ Eğer kritik insan hatası ortaya çıkarsa tüm sistemin arızasına neden olur. Bu nedenle kritik insan hatası nedeniyle ortaya çıkan arızalar donanım arızalarından ayrı olarak göz önüne alınırlar. Örneğin yedekli bir sistemde insanın neden olduğu yangın kritik insan hatası olarak vasıflandırılır. Bu durumda bir veya daha fazla birimin faal olup olmadığına bakılmaksızın tüm sistemin arızalandığı kabul edilir. Bu bölümde çeşitli sistemlerin kritik insan hatası ile Markov modellemelerine yer verilecektir.

³ Misra R.B., "Reliability evaluation of systems with critical human error", Microelectronic and Reliability, C.24, 743-759, 1984

12.4.1. Tamir edilemez iki birimlik paralel sistem:

Aşağıda geçişim diagramı görülen sistem kritik insan veya donanım arızası nedeniyle arızalanabilir. İnsan hatası, donanım hatalarından ayrı olarak; sistemin her iki biriminin faal olduğu andaki kritik insan hatası veya bir biriminin faal olduğu andaki insan hatası şeklinde ele alınmaktadır. Sistem, her iki biriminin faal olduğu anda kritik insan hatası veya bir birimi faal iken aynı insan hatası nedeniyle tamamen arızalanabilir. Her her iki biriminin de faal olması sistemin arızalanmasını engellemez. Normalde bir birimin faal olması sistem faaliyeti için yeterli iken kritik insan hatasının ortaya çıkması halinde bu durum ortadan kalkar.



Şekil 12.4-İki Birimlik Paralel Sistem Geçişim Diagramı

- 0 : Sistemdeki her iki birimde normal çalışıyor
- 1 : Sadece bir birim normal çalışıyor
- 2 : Sistem, kritik insan hatası nedeniyle arızalı
- 3 : Sistem, donanım veya kritik olmayan insan hatası nedeniyle arızalı
- λ : Birim sabit arıza oranı (insan hatası dahil)
- λ_{h1} : İki birim çalışırken sabit kritik insan hatası
- λ_{h2} : Bir birim çalışırken sabit kritik insan hatası
- $P_i(t)$: Sistemin i. durumda olma olasılığı
- $R(t)$: t zamanında sistem güvenilirliği
- AKOZ : Arızaya kadar ortalama zaman
- S : Laplace dönüşüm değişkeni

Modelle ilgili varsayımlar:

1. Kritik insan hatası bir birim veya iki birim normal çalışken ortaya çıkabilir.
2. Her iki birim de faal ve aktif durumdadır.
3. Arızalar istatistiksel olarak bağımsızdır.
4. Arıza ve kritik insan hata oranları sabittir.
5. Tüm sistem insan hatası nedeniyle arızalanır.

Modelle ilgili diferansiyel denklemler:

$$P'_0(t) + (2\lambda + \lambda_{h1})P_0(t) = 0$$

$$P'_1(t) + (\lambda + \lambda_{h2})P_1(t) = 2\lambda P_0(t)$$

$$P'_2(t) = \lambda_{h1}P_0(t) + \lambda_{h2}P_1(t)$$

$$P'_3(t) = \lambda P_1(t)$$

t = 0 anında $P_0(t)=1$ ve diğer başlangıç olasılıkları sıfıra eşittir. Eşitliklerin Laplace

dönüşümü dönüşümü yapılsa

$$sP_0(s) - P_0(0) + (2\lambda + \lambda_{h1})P_0(s) = 0$$

$$sP_1(s) - P_1(0) + (\lambda + \lambda_{h2})P_1(s) = 2\lambda P_0(s)$$

$$sP_2(s) - P_2(0) = \lambda_{h1}P_0(s) + \lambda_{h2}P_1(s)$$

$$sP_3(s) - P_3(0) = \lambda P_1(s)$$

$P_0(0)=1$ ve $P_1(0)=0$, $P_2(0)=0$, $P_3(0)=0$ olup yukarıdaki denklemde yerine konulup

denklem takımı çözülür ise:

$$P_0(s) = \frac{1}{s + a_1}, \quad P_1(s) = \frac{2\lambda}{(s + a_1)(s + a_2)}$$

$$P_2(s) = \frac{[2\lambda\lambda_{h2} + \lambda_{h1}(s + a_2)]}{s(s + a_1)(s + a_2)}, \quad P_3(s) = \frac{2\lambda^2}{s(s + a_1)(s + a_2)} \text{ olup}$$

$a_1 = 2\lambda + \lambda_{h1}$ ve $a_2 = \lambda + \lambda_{h2}$ olarak göz önüne alınmalıdır. Ters Laplace

dönüşümünün yapılması ile durum olasılıkları, örneğin; $P_0(t) = e^{-a_1 t}$, hesaplanabilir.

Laplace dönüşümlü sistem durum olasılıkları ile sistem güvenilirliği ifade edilmek istenirse, güvenilirlik, t zamanında sistemin faal olduğu sıfır ve bir durumlarında olma olasılıklarının toplamıdır.

$$R(s) = P_0(s) + P_1(s) = \frac{s + a_2 + 2\lambda}{(s + a_1)(s + a_2)} \text{ olup ters Laplace dönüşümü ile}$$

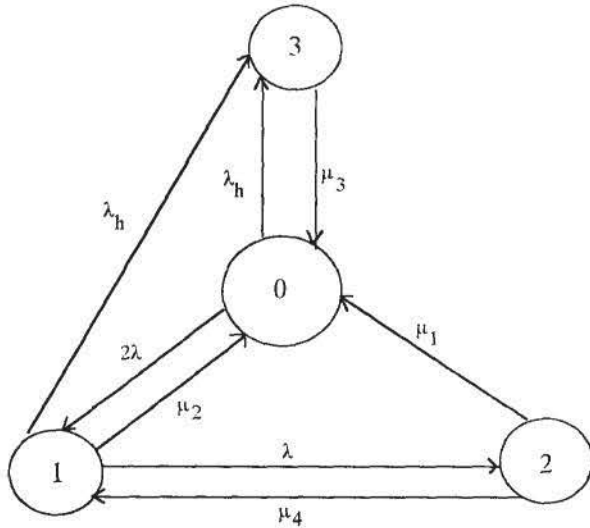
$$R(t) = (1 + A_1)e^{-a_1 t} - A_1 e^{-a_2 t}, \quad A_1 = 2\lambda / (a_2 - a_1)$$

olup AKOZ değerinin bulmak, Laplace dönüşümlü eşitlikte; s, sıfıra giderken güvenilirlik fonksiyonun limitinin alınması yeterlidir.

$$AKOZ = \lim_{s \rightarrow 0} R(s) = \frac{a_2 + 2\lambda}{a_1 \cdot a_2} \text{ şeklinde elde edilir.}$$

12.4.2. Tamir edilebilir iki birimlik paralel sistem:

Bu model, donanım arızası ve insan hatalarına maruz birbirinin aynı iki birimlik paralel sistemi ifade etmektedir. Sistemin faaliyetini sürdürdüğü herhangi bir anda, kritik insan hatasının ortaya çıkması sistemin faaliyetinin tamamıyla durmasına neden olmaktadır. Paralel sistemin faaliyetini gösterdiği sahadaki insandan kaynaklanan yangın tipik bir örnek olabilir. Arızalanan birim tamir edilerek normal çalışma moduna dönmektedir. Modelin durum uzay diagramı aşağıda görülmektedir.



Şekil 12.5-Kritik insan hatası içeren iki birimlik paralel sistem

Sistem diferansiyel denklem takımlarının kurulması esnasında yararlanılan semboller:

j	: Sistem durum indisi
$j=0$: Sistemdeki her iki birimde normal çalışıyor
$j=1$: Bir birim donanım arızası nedeniyle arızalı, diğeri normal çalışıyor.
$j=2$: Sistemin her iki birimi donanım arızası nedeniyle çalışmıyor, dolayısıyla sistem gayri faal.
$j=3$: Sistem kritik insan hatası nedeniyle arızalı
λ	: Birim sabit donanım arıza oranı
λ_h	: Sabit kritik insan hata oranı
μ_j	: j.sabit tamir oranı
$j=1$: 2. durumdan 0.duruma
$j=2$: 1.durumdan 0.duruma
$j=3$: 3.durumdan 0.duruma
$P_i(t)$: $J=0,1,2,3$ için, sistemin, t zamanında i. durumda olma olasılığı
S	: Laplace dönüşüm değişkeni

Modelle ilgili varsayımlar:

1. Tamir edilen birim veya sistem yenisi ile aynı performanslara sahiptir.
2. Her iki birim faal ve aktif durumdadır
3. Birim arıza oranı sabittir.
4. Kritik insan hata oranları sabit olup, her iki birimin faal veya tek birimin faal olması hallerindeki insan hata oranları birbirine eşittir.
5. Arızalar istatistiksel olarak bağımsızdır.
6. Tamir oranları sabittir.

Modelle ilgili diferansiyel denklemler:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (2\lambda + \lambda_h)P_0(t) = P_1(t)\mu_2 + P_2(t)\mu_1 + P_3(t)\mu_3$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + (\lambda + \lambda_h + \mu_2)P_1(t) = P_0(t)2\lambda + P_2(t)\mu_4$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} + (\mu_1 + \mu_4)P_2(t) = P_1(t)\lambda$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} + \mu_3P_3(t) = P_0(t)\lambda_h + P_1(t)\lambda_h$$

Sistem faaliyetine başlamadan önce her iki birimde arızalı olmadığı kabul edilmektedir. Bu durumda yani $t = 0$ anında sistemin "0" durumunda olma olasılığı, $P_0(0)=1$ olup diğer olasılıklar; $P_1(0), P_2(0), P_3(0) = 0$ dir. Denklemlerde sistemin durağan durum olasılıklarının yani zamana bağlı olmayan eşitliklerinin eldesi için türevlerinin sıfıra eşitlenmesi ve $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1$ olduğu göz önüne alınarak denklem takımının çözümü ile elde edilebilir.

$$P_0 = \left[1 + C_1 + 2\lambda^2 C + \frac{\lambda_h}{\mu_3}(1 + C_1) \right]^{-1}$$

$$P_1 = P_0 C_1$$

$$P_2 = P_0 2\lambda^2 C$$

$$P_3 = P_0 \frac{\lambda_h}{\mu_3}(1 + C_1) \text{ olup}$$

$$C = [(\mu_1 + \mu_4)(\lambda + \lambda_h + \mu_2) - \lambda\mu_4]^{-1} \text{ ve } C_1 = 2\lambda(1 + \lambda\mu_4 C) / (\lambda + \lambda_h + \mu_2) \text{ dir.}$$

Sistem paralel yapıya sahiptir Bu nedenle sistemin durağan durum hazır bulunuşluğu sistem faaliyeti için yeterli olan bir elemanın faal olduğu "1" durumunda veya her iki elemanın faal olduğu "0" durumunda olma olasılıklarının toplamına eşittir.

$$HB_{sistem} = P_0 + P_1$$

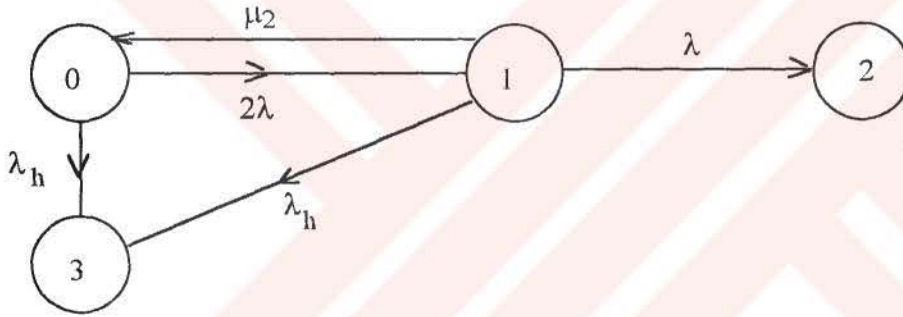
Kritik insan hatası nedeniyle sistemin arıza gösterme olasılığı, her iki birimin faal iken kritik insan hatası nedeniyle sistemin tamamen gayri faal olma hali veya bir elemanı faal iken kritik insan hatasının oluşması ile her iki elemanın dolayısıyla sistemin gayri faal olması hali olan, "3" durumunda olma olasılığıdır.

$$P_{kih} = P_3$$

Donanım arızası nedeniyle en az bir birimin arızalanma olasılığı sistemin bir biriminin arızalı olduğu "1" durumunda veya iki biriminin arızalı olduğu "2" durumunda olma olasılığıdır.

$$P_h = P_1 + P_2$$

Sistemin her iki elemanının arızalanması sistemin faaliyetinin sona ermesi demektir. Bu nedenle gerek kritik insan hatasının ortaya çıkıp iki biriminin arızalı olduğu "3" durumundaki tamir oranının, μ_1 , gerekse donanım arızası nedeniyle iki birimin de gayri faal olduğu "2" durumundaki arıza oranlarının; μ_3 , μ_4 sifira eşitlenmesi ile sistem güvenilirliği ve arızaya kadar ortalama zaman değerleri hesaplanabilir. Bu durumda durum uzay diagramı:



Şekil 12.6-Kritik insan hatalı, tamir edilebilir iki birimlik paralel sistem.

Modelle ilgili diferansiyel denklemler:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (2\lambda + \lambda_h)P_0(t) = P_1(t)\mu_2$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + (\lambda + \lambda_h + \mu_2)P_1(t) = P_0(t)2\lambda$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = P_1(t)\lambda$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = P_0(t)\lambda_h + P_1(t)\lambda_h$$

t = 0 anında, $P_0(t) = 1$ ve diğer durum olasılıkları sıfırdır. Denklem takımının Laplace dönüşümü ve gerekli kısaltmalardan sonra durumu:

$$sP_0(s) - 1 + (2\lambda + \lambda_h)P_0(s) = P_1(s)\mu_2$$

$$sP_1(s) + (\lambda + \lambda_h + \mu_2)P_1(s) = P_0(s)2\lambda$$

$$sP_2(s) = P_1(s)\lambda$$

$$sP_3(s) = P_0(s)\lambda_h + P_1(s)\lambda_h$$

Sistemin güvenilirliği en az bir biriminin faal olduğu "0" veya "1" durumlarında bulunmasına bağlıdır. Bu nedenle Laplace dönüşümlü güvenilirlik:

$$R(s) = P_0(s) + P_1(s)$$

Arızaya kadar ortalama zaman değeri Laplace dönüşümlü güvenilirlik fonksiyonun, s sıfıra giderken limiti olması nedeniyle⁴ yukarıdaki eşitliklerin sadece P₀(s) ve P₁(s) için çözümü yapılırsa:

$$AKOZ_t = \lim_{s \rightarrow 0} R(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \{P_0(s) + P_1(s)\}$$

$$AKOZ_t = (3\lambda + \lambda_h + \mu_2) / [(2\lambda + \lambda_h)(\lambda + \lambda_h + \mu_2) - 2\lambda\mu_2]$$

denklemleri elde edilir. AKOZ_t denkleminde, μ₂ değerinin sıfıra eşitlenmesi ile tamir özelliği olmayan, kritik insan hatasını içeren iki birimlik paralel bir sistemin arızaya kadar ortalama zaman formülünün aynısının eldesi mümkündür.

⁴ Balbir S.Dhillon, Reliability in System Design and Operation, (New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982), s.21,

13.ETKİN İNSAN BİLEŞENLİ SİSTEM TASARIMI

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, insan menşeyli arıza nedenleri incelendiğinde, arızaların büyük kısmı, sistem geliştirme programlarında yetersiz sistem mühendisliği yaklaşımlarının olduğu emarelerini taşımaktadır. Bu nedenle, insan hatalarının oluşumunu azaltan, dolayısıyla sistem performansı içinde insan performansının güvenilirliğini arttırmanın yolu: Sistem ve insan mühendisliğinin **düzeyini** ve sistemlerin kavramsal safhadan başlayan; tanımlama, tasarım, geliştirme, test ve değerlendirme dahil işletmeye dahil edilinceye kadar olan safhalar içinde **etkinliğini** arttırmaktır. Sistem mühendisliğince kullanılan, sistemin dizayn ve geliştirme safhalarında daha fazla uygulanabilirliğe sahip;

- Matematiksel modeller,
- Mantıksal sistem analiz ve sentez
- Mühendislik çizimleri
- Benzeşim ve laboratuvar tesleri
- Son madde ve sistem testleri
- İşletim testleri

gibi metodolojiler mevcut olup, **sistem etkinliğini** biçimlendiren metod: **Matematiksel modellemeler**dir. Harekat araştırmacıları tarafından kullanılmaya başlanan matematiksel modellerin gelişmesinde, bu modelleri sistem parametrelerinin sayısal olarak analiz ve sentez edilmesi için kullanan, sistem güvenilirliği ve idamesi mühendisliğinin de katkısı mevcuttur.

13.1.MATEMATİKSEL MODELLEME

İnsan bileşenin sistem dizaynında etkin kullanımını öngören sistem mühendisi açısından matematiksel modellerin ana ve etkin metodoloji olduğuna dair birçok neden sıralamak mümkündür.¹

¹ P.Chase Wilton.. "Measurement and prediction of human performance as a quantitative factor in system effectiveness", Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1965, ss. 803-

- Başlangıç sistem etkinliği matematiksel modeli; sistemin, amaca hizmet edecek şekilde dizayn ve imal edilip edilmediğini değerlendirecek sayısal hedefleri belirtir.

- Sistem etkinliği matematiksel modelinin, sistem fonksiyon modeli ile uygulanmasıyla sistem mühendisi, tüm gerekli parçalar, materyaller ve işlemler seçilinceye ve fonksiyonel bir bütün olarak entegre edilinceye kadar, ana sistem parametrelerini tanımlayacak ve geliştirecek uygun aletlere sahiptir.

- Tutarlı bir sistemin dizaynında, alet ve insan bileşenlerinin kullanımını gösteren fonksiyon bloklarında sayısal performans değerlerinin ardışık ve daha kesin olarak belirleyerek, insan-cihaz bileşen kombinasyonlarının değişen giriş çıkış değerlerinin, önceden belirlenmiş çıktılarının eldesi için sistem kapasitesi üzerindeki etkisini analiz ederek, oluşum gerçekleştirilir.

- Sistem mühendisleri için; *insan bileşenini* en iyi şekilde kullanan, insan ve cihaz bileşenleri arasındaki etkileşimi sayısal giriş-dönüşüm-çıkış değerlerini tanımlayan ve belirleyen matematiksel modelin kullanımı esastır. İnsan performansına atanacak değer; sistem etkinlik modeli, güvenilirlik, idame edilebilirlik, emniyet veya diğer bir sistem oryantasyonlu matematiksel modelin sayısal paylaşımıdır.

- Sistem dizayn aşamasında, ekip içinde doğrudan yer alan ve sistem mühendisliği metodolojisi girdilerini kullanan, insan performansı ile ilgilenen sistem mühendisi, *insan bileşenlerinin güvenilir kullanımını* sağlayacak şekilde sistemin dizayn edilmesini etkileme şansına sahiptir.

- Sistemdeki çeşitli insan bileşenlerinde belirli sayısal performans elde etmeye yöneltilmiş sistem mühendisi, sistem etkinlik modelinde belirtilen değerleri karşılayan hatasız insan performans değerine erişilinceye kadar sistemin test ve değerlendirme çalışmalarına da katılmalıdır.

- Seçilen sistemin uygulanması için son maddelerin üretiminden sonra sistem mühendisi, son maddelerin ve sistem fonksiyonel performansının doğruluk ve bağımlılığını ölçerek, sistem etkinliği matematiksel modelinde ifade edilen parametrik değerlerin ne oranda karşılandığını değerlendirir.

•Test aşamasında bir arızanın meydana gelmesinden sonra arıza incelenir ve nedenleri araştırılır. Eğer arızanın sebebi insan hatası ise sistem mühendisliği timindeki insan performansı uzmanı hatanın tamamıyla **rastgele** veya **sistematik** olup olmadığına karar verir. Sistem dizayn ekibinin arızanın büyük bir olasılıkla insan hatasından kaynaklandığına karar verilmesi halinde test işlemlerine ara verilir. İnsan bileşeni uzmanlarınca, laboratuvarında veya dinamik simülasyon modellerinde arızaya sebep olabilecek olaylar, insan gücü gereksinimleri, **sistem tamir**'ine karar verilmesi için denir. Tamir ana cihaz değişikliğinden, ufak çapta yöntem değişikliğine kadar her şey olabilir.

•Her olayda, sistem arızasının insan hatasından kaynaklanması beklentilerini makul düzeye indirmenin yolu; sistem geliştirme yöneticisi ve mühendislerinin anlayabileceği ve üzerinde kararlara varabileceği: ***İnsan bileşenin performansı, sistem başarı veya arızasının esas nedeni, açık ve net olarak, belirli insan görevlerinin doğru performans göstermesine dayalı olduğunda, cihaz bileşenin performansına fonksiyonel olarak eşit*** olur.

İnsan bileşeni, tipik bir sistem faaliyetinde, normalde verilen görevin yerine getirilmesi için gerekli olandan daha fazla fizyolojik ve psikolojik kapasiteye sahiptir. İnsanların sahip olduğu bu yedek, kapasite ve kendi kendine uyum yeteneği, eğer sistem uygun dizayn edilirse bazı görevlerde insanları ideal bileşen kılarlar.

Aşağıdaki tabloda, sistem mühendisliği takas çalışmalarında alet ve insan seçimine yardımcı olabilecek bilgiler özetlenmeye çalışılmıştır.

TABLO I
İnsan-Alet Karşılaştırması

GENEL TAKAS KRİTERLERİ		
PERFORMANS	ALET	İNSAN
İŞLETME:	<ul style="list-style-type: none"> -Uyarıcılara karşı tam hassasiyet -Dış faktörlere karşı duyarsızlık -Sürekli kontrol -Hız -Doğruluk -Hassasiyet -Karmaşık programlama (tümdengelim mantık) -Yeknasak ve tekrarlı işler 	<ul style="list-style-type: none"> -Düşük düzeyde enerji algılama, uyarıcıdaki farklılıkları ayırt etme - Fazla bilgi saklama ve gereğinde kullanma -Tümevarım muhakeme, değişken programlama, karar verme -Tecrübeden yararlanma -Değişken izleme ve kontrol - Manüplasyon
İDAME:	<ul style="list-style-type: none"> -Statü Kontrolü - Erişebilirlik - Tamir edilebilirlik - Servis olanağı - Taşınabilirlik 	<ul style="list-style-type: none"> -Maharet ve bilgiye sahip olmayı gerektirir. -Sabite karşı değişken yordam -Ortaya karlı fazla manüplasyon -Güdüleme ve motivasyon
EMNİYET:	<ul style="list-style-type: none"> - Gürültü -Titreşim -Hızlanma -Isı -Basınç -Atmosfer şartları 	<ul style="list-style-type: none"> -Psikolojik sınırlar -Psikolojik gerilim -Fiziksel hasar -Gıda -Kaçma, hayatta kalma, iyileşme
GÜVENİLİRLİK:	<ul style="list-style-type: none"> -Çalışma gerilimi -Doğruluk -Karalılık -Dayanıklılık -Hızlı telafi -Fazlalık 	<ul style="list-style-type: none"> -Karmaşık yeterlilik -Adabte olabilme -Değişkenlik -

İnsan hatalarının öngörümü ve herhangi bir anda ortaya çıkışından sakınacak şekilde dizayndan sorumlu, sistem tasarım ekibi, çeşitli çevre ve çalışma koşulları altında sistemin görevini yerine getirecek insan veya makina kullanımının avantaj veya dezavantajları konusunda derinlemesine bilgiye sahip uzman kişilerden oluşur.

İnsan performansı, sistem etkinliğinin sayısal ölçülerine istatistiksel bağımsız faktör olarak doğrudan katkıda bulunur. Hatta personel performansı; çalışma, idame,

emniyet ve güvenilirlik için insan ve alet bileşeninin entegrasyonunu etkileyen alet dizayn özellik ve karakteristikleri yoluyla sistem etkinliğini de doğal olarak etkiler.

13.2.SİSTEM GELİŞTİRME YAKLAŞIMLARI ve İNSAN:

Aşağıdaki tabloda, insan performansına ilişkin teknik verilerin elde için insan mühendisliği ile alakalı sistem mühendisleri tarafından ihtiyaç duyulan metodolojik yaklaşımlar ve her yaklaşımın bağıl önemi kısaca özetlenmeye çalışılmıştır.

TABLO II
Sistem Geliştirme Yaklaşımları

METODOLOJİK YAKLAŞIMLAR	PERFORMANS GİRDİLERİ	HER YAKLAŞIMIN BAĞIL ÖNEMİ
Matematiksel Modeller	Sistem etkinlik kriterinin eldesi için başarılı insan performansına dayalı muhtemel bağımlılık seviyesinin tahmini.	Sistem; performans/dizayn gereksinimi olarak başarılı insan performansının bağıl önemi ortaya çıkar.
Mantıksal sistem analiz ve sentezi	İnsan bileşenleri tarafından icra edilecek fonksiyonel gereksinimlerin tahsisi	Personel veya cihaz tercihlerinin belirleyen dizayn yaklaşımlarının ortaya çıkması nedeniyle sistemin geliştirilmesinde önemli bir noktadır.
Mühendislik tasarımları	Personel ve cihaz son maddeleri arasında giriş-dönüşüm-çıkış etkileşimleri, ergonomik çalışmalar	Cihaz tasarımının personel görev performansına olanak tanınması veya engellemesi belirlenir
Simülasyon ve laboratuvar testleri	Tanımlanmış cihaz arakesitleri ile ilgili insan görev performansının yeterliliği hususundaki sayısal verilerin toplanması.	Belirli insan ve cihaz etkileşimlerin, doğruluk ve bağımlılığını artırmak için dizaynı anlamaya ve geliştirmeye olanak tanır.

Son madde ve Sistem testi:	İşletimde, bakımda ve cihaz son maddelerinin kontrolünde insan performansının gözlenmesi ve kaydı	Ciddi şekilde sistem performansını düşmesine sebep olan, sistemin modifikasyonunu gerektirebilecek, insan performans hatalarının analizine olanak tanır.
İşletim testleri:	Belirgin arızalarda insan hatasının birincil veya ikincil neden olup olmadığının tesbiti amacıyla öncelik analizi	Hataya sebep olabilecek özelliklerin gidermek amacıyla dönüşüm programlarını için cihaz modifikasyonlarının dizaynına olanak sağlar.

Yukarıda tabloda özetlenmeye çalışılan sonuçların eldesi için tasarım mühendisi ile beraber sistem mühendisi, toplanan insan gücü verilerinin ve bu verilere dayalı yapılacak öngörülerin doğruluk güven düzeyleri tahminlerine ihtiyaç duyacaklardır.

İnsan mühendisliği uzmanları da, donanım mühendisliği uzmanlarının, cihaz performans güvenilirliğinin öngörümünde karşılaştıkları aynı istatistiksel olasılık problemleri ile ilgilenirler. Sistem dizaynında insan bileşeninin doğru olarak uygulanabilmesi için ihtiyaç duyulan teknoloji, mekanik ve elektronik bileşenlerin uygulanması kadar iyi anlaşılmalıdır. Belki, kullanılacak olan insan bileşeninin tabiyatından dolayı, verilen bir sisteme ait öngörülerde daha fazla belirsizlik ile karşılaşılabilir.

Bu nedenle gerçekçi sistem güvenilirliği çalışmalarında insan makina sistemlerindeki insan bileşeni ve sistem performansı üzerindeki etkisi kantitatif olarak belirlenmelidir. Aşağıdaki tabloda donanım ve insan güvenilirliği mukayese edilmeye çalışılmaktadır.²

² Kang W.Lee, Frank A.Tillman, James J.Higgins, "A literature Survey of the Human Reliability Componet in a Man-Machine System", IEEE, Transactions on Reliability, Vol. 37, No.1, 1988

TABLO III

İnsan ve Donanım Güvenilirliği Mukayesesi

	İnsan Güvenilirliği		
	Donanım Güvenilirliği	Ayrık Görevler	Sürekli Görevler
1. Sistem	Belirli fonksiyonları yerine getiren elemanlar kümesi.	Birçok davranış birimlerinde meydana gelen görev	Dikkat, izleme ve dengeleme gibi sürekli görev
2. Sistem konfigürasyonu	Öğeler arası fonksiyonel ilişki	Davranış birimleri arasındaki ilişki	Görev birimleri arasındaki fonksiyonel ilişkileri belirlemeye gerek yoktur.
3. Sistem arıza analizi	Hata ağacı analizi	İnsan hatalarının kategorilere ayrılması	Sürekli sistem çıktısı için ikilik mantığın kullanılması
4. Arıza Özelliği	<ul style="list-style-type: none"> . Genellikle ikilik arıza mantığı . Arızanın çok boyutluluğu . Müşterek sebep arızası 	<ul style="list-style-type: none"> . Bazen ikilik arıza mantığını insan faaliyetine uygulamak zordur. . Hatanın çok boyutluluğu . Müşterek sebep arızası . Hatayı düzeltme 	<ul style="list-style-type: none"> . Bazen ikilik arıza mantığını insan faaliyetine uygulamak zordur. . Hatanın çok boyutluluğu . Müşterek sebep arızası . Hatayı düzeltme
5. Arızanın nedeni	Çoğu donanım arızaları fiziksel veya kimyasal yasalar ile izah edilebilir.	İnsan hatalarının açıklaması olarak kabul edilebilecek yasalara genellikle rastlamak zordur	İnsan hatalarının açıklaması olarak kabul edilebilecek yasalara genellikle rastlamak zordur
6. Sistem güvenilirliği değerlendirmesi	<ul style="list-style-type: none"> . Arıza mantığının olasılıksal olarak ele alınması ve öğeler arası istatistiksel olarak bağımsızlığın kabulü ile matematiksel modeller çıkarılır. . Elemanlar arası istatistiksel bağımlılığın gerekli olduğu asamali görev ve sebeke güvenilirliklerinde gerçek sistem güvenilirliğinin değerlendirilmesi zordur 	Davranışsal birimler arası fonksiyonel ilişkinin tanımlanmasındaki problemler nedeniyle sistem güvenilirliğinin değerlendirilmesi zorluğu mevcuttur.	Sistem çıktısı için ikilik hata mantığının olasılıksal kullanımı ile stokastik modeller elde edilir.
7. Veri	İnsan güvenilirliği ile kıyaslandığında çoğu makina ve teçhizat için çok yaygın ve bol miktarda veri tabanı ile mevcuttur.	İnsan davranış birimleri için güvenilir. ve faydalı veri tabanına rastlamak zordur. . Genellikle uzman kişilerin yargısına bağımlıdır.	İnsan davranış birimleri için güvenilir. ve faydalı veri tabanına rastlamak zordur. . Genellikle uzman kişilerin yargısına bağımlıdır.

Nadiren de olsa verilen herhangi bir görevin icrasında insan bileşeninin toplam kapasitesinin bir kısmı kullanılmakta ve iyi eğitilmedikçe ve disipline edilmedikçe oldukça değişken ve güvenilmez sayısal performans gösterebilmektedirler. Bu yüzden istatistiksel olarak insan performansı çıktı ölçümlerinin standart sapmaları, cihaz girdi-dönüşüm-çıkış fonksiyonlarının etkileşimleri için tanımlanan tolerans sınırlarına nazaran daha büyük değerler olabilir.

Bu nedenle, bir sistemin performansının düşmesine sebep olabilecek büyük insani farklılıkları önleyecek şekilde, cihaz-insan bileşenlerinin tasarımı gerekir..

Aşağıdaki tabloda, *insan hatasının oluşumunu azaltacak* dizayn özelliklerini birleştirmek amacıyla sistem geliştirmede metodolojik yaklaşımların kullanımlarıyla ilgili tahmini *bağlı başarı olasılıkları* gösterilmeye çalışılmıştır.

TABLO IV³

Sistem geliştirme döngüleri ve başarı

Sistem geliştirme döngüsü	Tahmini bağlı başarı
Matematiksel model	Yüksek
Sistem Analiz	Çok Yüksek
Mühendislik tasarım	Yüksek
Simülasyon/Laboratuvar testi	Orta
Son madde/Sistem test	Düşük
İşletim Testleri	Çok Düşük

•İnsan bileşeni performans değerlerinin kabulü için başarı olasılığı yukarıda görüldüğü gibi matematik modelleme bölümünde bira düşüktür. Bunun nedeni; yönetim kararları doğrultusu olarak uygulanacak politika, eğer amaç arzu edilen sistem performansının mevcut teknolojinin optimum kullanımı ile elde edilmesi şeklinde ise bazı en uygun önerilerin kabulüne tahditler getirir.

•Bir kere, genel kaba düzeyde sistem kararları verildikten ve detaylı son madde performans dizayn karakteristiklerinin tesbit amacıyla analiz işlemlerinin

³ P.Chase Wilton, ibid., s.814

başlamadan sonra, insan bileşeninin uygulaması ile sorumlu sistem mühendisi, eğer fonksiyonel gereksinimlerin belirlenmesini analiz çalışmalarında rol alıyor ise, önerilerinin kabulüne ilişkin başarı yüzdesi yüksektir.

- Aslında hatasız görev performansına olanak sağlayacak sistem dizayn karakteristiklerini etkileyebilecek imkanına sahip en yüksek nokta olup zaman ilerledikçe son madde dizayn kararları tamamlandıkça bu gibi önerilerin kabulü şansı zayıflar.

- Mühendislik tasarımları, görüntüleme, işletim ve bakımın kontrolü, bileşenlerin erişilebilirlik açısından bir araya getirilmeleri, test noktalarının belirlenmesi gibi cihaz ve insan bileşenlerinin kesişimleri ile ilgili oldukları için diğer bir önemli fırsattır.

- Son madde ve sistem test verilerinin sonucu olarak güvenilir insan performansı olasılığını arttıracak sistem dizayn değişikliklerinin elde başarı şansı çok iyi değildir. Dizayn işlemi gerçekleştirildikten veya daha fazla rastlanıldığı gibi prototip cihazın ortaya çıkarıldığı hızlandırılmış program sonunda, çalışmayacak veya çok büyük güvenlik hatası olacağına ilişkin aleni bulguların olması halinde değişik yapılması gerekebilir.

- Geçekte, günümüz sistem geliştirme programlarındakinden daha fazla olarak, büyük çapta başarısızlıkların tavsiye edilen uygulanabilir değişikliklerden önce olması arzu edilmektedir.

- Mevcut veri kaynaklarını kullanmada yeterli bilgi ve maharete sahip sistem mühendisi, sistemin insan bileşenlerinin olası performans güvenilirliklerini, sistem dizayn özelliklerini (işletme, bakım ve idame, kontrol personelinin kapasitelerini belirleyecek) göz önüne alarak çok yüksek güven düzeyinde belirleyebilir.

14.BAKIM, İDAME VE KALİTE KONTROL FAALİYETLERİNDE İNSAN GÜVENİLİRLİĞİ

Bakım mühendisliği cihazların faal tutulması ile ilgili teknik problemler ve sistem kullanımda iken arızalanan cihazlarının tamiri faaliyetleri ile ilgidir. İdame edilebilirlik ise sistem dizayn, geliştirme veya fabrikasyon aşamasında iken gelecekteki sistemin tamirine temel teşkil edecek prensiplerin belirlenmesi ve uygulanması ile ilgilidir.

Önceleri insan faktörü üzerine yapılan çalışmalar bakım faaliyetlerin de etkilenecek sistem tasarım özellikleri üzerine yoğunlaşmış olup bugün insan, bakım ve idame mühendisliği, dizayn, bakım personelinin eğitimi, alet ve edevatın seçim ve temini gibi sahalarda karşılıklı etkileşim halindedir.

14.1. BAKIM ve İDAME FAALİYETLERİNDE İNSAN FAKTÖRÜ:

İnsan hatalarının önemli bir kısmı bakım aşamasında ortaya çıkmakta olup, cihaz güvenilirlüğünde bakım personeli önemli rol oynamaktadır. Bakım personelinin zamanın çoğunu **hataların teşhisi** almaktadır. Otomatik test cihazlarının yaygın şekilde kullanımından önce elektronik cihazlarla ilgili bakım personelinin zamanını yaklaşık olarak aşağıdaki tabloda gruplanmıştır.¹

TABLO 1

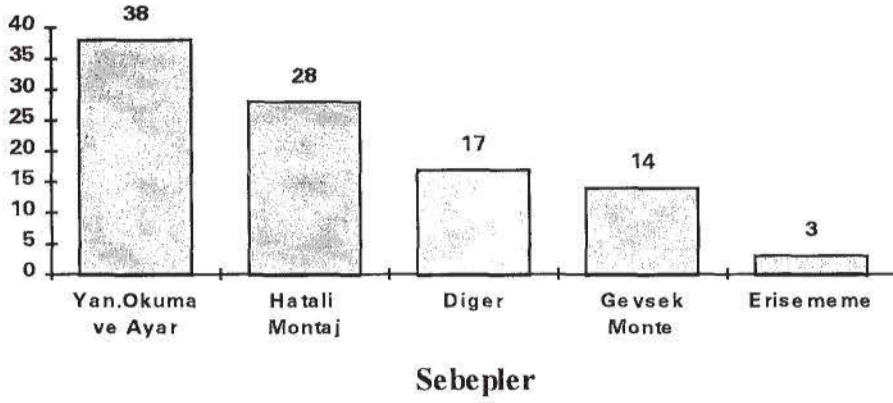
Bakım Personeli Çalışma Süresi Dağılımı

Faaliyet	Yaklaşık Yüzde
1.Arızanın tesbiti	65-75
2.Giderme faaliyeti	15-25
3.Kontrol	5-15

Füzelerde arızaya sebebiyet veren bakım hatası yüzdelerinin yaklaşık değerleri aşağıdaki histogramda yaklaşık değerler kullanılarak belirtilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi

¹ J.M Christensen. ve Howard., *Field experience in maintenance*, (New York: Plenum Press, ,1981), ss. 111-133

bakım hatalarına sebep olabilecek en yüksek değerler kadran ve göstergelerin yanlış okunma ve ayarlanmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 14.1.-Füze sisteminde bakım hatalarının sebep olduğu arıza yüzdeleri

İnsan faktörü bakım olayında çeşitli yönleri ile ele alınmalı ve değerlendirilmelidir.

•Bakım Personelinin Eğitim ve Tecrübesi:

Ayarlama, sökme, hizaya getirme gibi çeşitli görevlere ilişkin yapılan araştırma faaliyetleri sonunda ortalama insan güvenciliği 0.987 olarak tesbit edilmiştir.² Bu, bakım personeli tarafından gerçekleştirilecek 1000 faaliyetin yaklaşık 13 adedinin hatalı şekilde sonuçlanabileceği anlamını taşımaktadır. Eğitim ve tecrübenin bakım personelinin performansları üzerindeki etkisi tartışılmaz.

Bakım faaliyetlerini gerçekleştirmek üzere seçilen kişilerin eğitimi için gerekli insan gücü karakteristiklerine ilişkin bilgiler eğitim ve tasarım uzmanları açısından hayati önem taşımaktadır. Yapılan bir çalışmaya göre³, performanslarına dayanılarak yapılan sıralamada üst düzeyde olan teknisyenlerin; yüksek moral, duyuşsal denge, fazla tecrübe, yetenek karakteristikler sahip olup daha az yoğunluk emaraları gösterdikleri belirlenmiştir. Bu çalışma; moral, tecrübe ve yetenekler ile görev performansı arasında pozitif bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur.

² D.Sauer., W.B. Chambbell, *Relationships Between Human Recource Factors*, Report No. AFHL-TR-76 - 85/AFWL-TR-76-301, Air Force Human Resources Lab., Ohio-1976

³ D.Sauer., W.B. Chambbell, *Ibid.*

•Teşhis Hataları:

Arızalı parçaların teşhisinde insanlar tarafından yapılan hatalar, bakım faaliyetlerinde üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Genellikle hatalarını teşhisine ayrılan zamanlar etkin olarak kullanılmamakta çoğu zaman tamir edilmek üzere sökülen parçaların bozuk olmadığı görülmektedir. Uçak sistemleri ile ilgili yapılan çalışmada tamir amacıyla sökülen bozuk olmayan parçaların bakım zamanının %40 ile %50'si arasında olduğu tesbit edilmiştir. ⁴ Bu kadar yüksek bir değer alet çalışma güvenilirliği üzerinde önemli bir etkisinin olacağı açıktır.

•Bakım Verilerinin Kaydı:

Bakım olayında operatör tarafından yapılan hataların tanımlanmasına ilişkin çeşitli eksiklik, fazlalık ve yanlışlıkların yapılması olasıdır. Veri sahalarının kodlanmasıyla ilgili yapılacak bir çalışma ile aynı tip hatanın birden fazla formda yer aldığı gözlenebilir. Hatanın oluşumu, çoğunlukla kullanılan karakter tiplerine bağlıdır. Aşağıdaki tablodan da görülebileceği gibi en yüksek hata oranları alfabetik karakterler ile yapılan ifadelerde ortaya çıkmaktadır. Hataların ortaya çıkışının karakterlerin kullanım sıklığı, veri sahası içindeki yeri ve cihaz hakkındaki bilgi ile ilgisi yoktur.¹

TABLO 2
Hataların Ortaya Çıkışı

Kod tipi	Hata Oranı
1.Numara	En düşük
2.Alfabetik karakterler	Yüksek
3.Alfanümerik karakterler	orta

•Aletlerin Taşınması:

Aletlerin taşınmasının bakım faaliyetindeki önemi büyüktür. Bileşen veya alt sistemin uygun olmayan şekilde taşınması çok büyük arıza veya kazalar ile sonuçlanabilir. Bu nedenle tutamaçsız maddeler, ağır maddeler, tutulması zor maddeler gibi faktörlere gereken önem verilmelidir.

⁴ J.M Christensen. ve Howard ,op.cit., ss.111-133

•Çevresel Faktörler:

Bakım faaliyetinin etkinliği büyük oranda çalışma ortamına bağlıdır. Isı, toz, yorgunluk, eksik veya uygun olmayan aletler, kişisel problemler bakım olayında insan hatalarına sebep teşkil edebilir.

14.1.1. Bakım ve İdame Karakteristikleri:

Sistemler karmaşıktıkça bakımları da daha zor ve masraflı olmaktadır. Bu nedenle ürün veya sistemin tasarımında öncelikle bakıma dayalı maliyet düşürücü tedbirlerin göz önüne alınması gerekmektedir. Gözleme esasta idrak problemi iken bakım performansı psikomotor bileşenlerin önemli bir kısmını içerir. Bakım genellikle hassas psikomotor performansı kötü yönde etkileyen zor ortamlarda gerçekleştirilir.

Makinaların içi çoğu zaman karanlıktır. Çalışma ortamı sıkıcıdır. Minyatürleşmeye doğru yönelim nedeniyle arızalı parçalara erişim gittikçe zorlaşmaktadır. Sistemlerin saha bakımları çoğu zaman çevresel şartların: yağmur, soğuk, sıcaklık v.b. uç noktalarda olduğu ortamlarda gerçekleştirilir.

Bakım sık sık kısa zamanda gerçekleştirilmesine ilişkin baskı, fiziksel tehlikelerin mevcudiyeti, yeterli olamama endişesi gibi yüksek gerilim altında gerçekleştirilir.

a.Ehliyetli Bakım Teknisyeni Karakteristikleri:

Bakım teknisyeninin işini etkin bir şekilde yerine getirebilmesi için bazı karakteristiklere sahip olması gerekir. Bu karakteristikler ⁵ ; bilgi, esneklik ve yeterlilik olarak özetlenebilir. Eğer bu gereksinimler etkin olarak karşılanamaz ise tasarım mühendisleri; adım-adım yordamlar, görüntüler, alt sistem düzeyinde kontroller gibi tasarım karakteristiklerini göz önüne almalıdır. Bütün bunların yanında bakım olayını gerçekleştirecek personelinde sahip olduğu ve göz önüne alınması gereken özellikleri mevcuttur.

b.Acemi Bakım Teknisyeninden Beklenenler:

Bazen zorunlu olarak düşük ehliyet düzeyinde teknisyenlerin bakım olayında istihdamı gerekebilir. Bu durumda aşağıda belirtilen hususların ortaya çıkması olasıdır. ⁶

⁵ Cox W. ve Cunningham C.E., *Applied Maintainability Engineering*, s.400. , New York: John Waley & Sons, 1972

⁶ A.D. Swain, *Maintenance Diagrams for Preventive Maintenance of Ground Electronics Equipment*, American Institute for Research, Pittsburgh

- Çeşitle montaj ve dömонтаj hataları
- Aksaklıkların saptanması ve giderilmesinde yetersizlikler
- Basit aritmetik işlemleri yapabilme
- Osilaskop görüntülerini yorumlayabilme
- Temel geometrik formları ayırt edebilme
- Renkleri belirleyebilme
- Yüksek okul düzeyinde okuma ve yazma becerisi
- Beylik aletleri kullanabilme
- Tüm potansiyel cihaz tehlikelerine karşı uyanık olmama
- Dönel kontrolleri, mafsallı anahtarları kullanabilme becerisi

c. Sistem hazır bulunuşluğu üzerinde insan hatasının etkileri:⁷

Makina arızaları ile insan hatalarının sentezindeki matematiksel karmaşıklık nedeniyle bakım politikalarına uygulanabilecek analitik yeterli analitik sonuçlar mevcut değildir. Aşağıda açıklanan iki metod bu probleme yaklaşım şekillerini ortaya koymaktadır.

I. Periodik olarak test edilen sistemler:

Nülear güç santralleri santralin normal çalışması esnasında devre dışı olan birçok atıl sistemi içermektedir. Bu sistemler olağan üstü hallerde devreye girmekte ve çalışıp çalışmayacağından emin olmak için de periodik olarak muayeneye tabi tutulmaktadırlar. Bu test ve bakım aşamasında insan hatalarının ortaya çıkması olasıdır.

Örneğin seri olarak bağlanmış iki valf düşününüz. Valfler normal olarak kapalı olup mantıksal olarak paralel bir yapı oluştururlar. Çünkü, eğer amaç sistemi isole etmek ise birinin kapanması bu iş için birinin kapanması yeterlidir (*2'nin 1'i:G sistem*). Valfler test için açılabilir ve bakım operatörü valflerden bir veya ikisini açık unutabilir.

(n'in k'sı:G) tip sistemler: Bu tip sistemler **n** adet bileşenden meydana gelmektedir. Sistemin faaliyeti için en az **k** adet birleşenin faal olması gerekmektedir. n adet kablo ile yapılan bir bağlantıda yükün taşınabilmesi için en az k (0 > k <= n) adedinin faal olması gerekiyor ise bu tip sistem (n'in k'sı) tipe örnek teşkil edebilir. Tüm bileşenlerin güvenilirlikleri aynı ise sistem güvenilirliği:

$$R_s(t) = \sum_{i=k}^n C_n^i [R_i(t)] [1 - R_i(t)]^{n-i}$$

⁷ Kyung S. Park, *H. Reliability*, Sayfa:283, (New York:Elsevier Science Publishing, 1987), s.283

Çeşitli (*n'in k'sı:G*) tip sistemler için insan hatasını göz önüne alan birçok hazır bulunamama formülleri ⁸ geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada test aşamasında bileşenlerin insan hatasına dayalı olarak arızalanmaları göz önüne alınması aşağıdaki varsayımlara dayalı olarak yapılmaktadır:

1. Sistemin oluşturan bileşenlerin arızaları bağımsız olup arıza oranları, λ , sabit ve birbirine eşittir.

2. Sistemi oluşturan bileşenler sırasıyla muayene edilmekte olup muayene süresince, t_m , çalışmamaktadır. Sistemin diğer bileşenleri aşamasında çalışmamaktadır. (*n-1'in k'sı:G*) yapısında faaliyet göstermektedir.

3. Periyodik muayeneler arasındaki süre, t_0 , olup muayene döngüsü ($t_0 + n.t_m$) dir.

4. Şayet hata j ardışık zamanlarında oluşmuş ise şartlı insan hata olasılığı, q_j dir.

(*2'nin 1'i:G*) sistemin ortalama hazır bulunamaması: U

$$\cong U_M + U_H$$

Toplam hazır bulunamamaya donanım arızalarının katkısı, U_M ,

$$= \frac{(\lambda t_0)^2}{3} + \lambda t_m$$

İnsan hata olasılığının katkısı, U_H ,

$$= q_0 q_1 + q_0 \lambda t_0 + \frac{2q_0 t_m}{t_0}$$

Alınacak sonuç insan hatalarını şartlı olasılıklarının sağlıklı olarak teminine dayanmakta olup ardışık hataların oluşmasından operatörün haberdar edilmemiş olması gerekmektedir.

II. Optimal muayene aralığı:

Yangın söndürücüler ve belirli silah sistemleri olağan üstü hallerde kullanılmak üzere muhafaza edilirler. Eğer muhafaza edildikleri süre içerisinde arızalanırlar ise gerekli olduğu anda çalışmayacaklardır. Bu olasılığı azaltmak için cihazlar belirli aralıklar ile muayene edilmeli ve arızalı ise tamir edilmeli veya gerekiyor ise yenileri ile değiştirilmelidir. Muayene ve tamir sistemin faal olmamasını gerektirir iken muayene esnasında arıza insan hatası nedeniyle saptanamayabilir. Bu hususta yapılan iki temel hata bazı bileşenlerin muayene edilmelerinin unutulması ve uygun yapılmamasıdır.

⁸ Apostolakis G. & Pansal P., "Effect of human error on the availability of periodically inspected redundant systems", IEEE Trans. Reliability, ss.220-225. (1977)

Muayene esnasında insan hatalarını da göz önüne alan, optimal muayene aralığının saptanması amacıyla geliştirilen matematiksel modelde⁹ tamir edilen elemanın yeni eleman ile aynı özellikleri taşımakta olduğu kabul edilmektedir.

t_i : Muayene için gerekli süre

t_r : Tamir için gerekli süre

T : Muayeneler arası zaman

q_h : Muayene aşamasındaki insan hata olasılığı

Birim zaman içinde sistem hazır bulunmuşluğu muayeneler arası zaman ve insan hata olasılıklarının performansı olarak ifade edilmektedir. Birim zaman için hazır bulunmuşluk muayeneler arası zaman insan hata olasılıklarının fonksiyonu olarak ifade edilmiştir.

Cihaz arıza yoğunluk fonksiyonu üssel, muayeneler arası optimal süre olarak olağan üstü hallerde cihaz hazır bulunmuşluğunu azami kılan değer olarak aşağıda belirtilen denklemin kökleri olduğu ifade edilmiştir.

$$(\lambda T + \lambda t_i + 2Q + 1).e^{-\lambda T} = Q.e^{-2\lambda T} + Q + 1 \quad Q = \frac{q_h}{1 - q_h}$$

d.Arızayı bulma ve giderme:

Otomasyona gidiş sistem yapılarının daha karmaşık olmasına neden olurken sistemin tamir ve bakımı da önem kazanmakta ve zorlaşmaktadır. Bazı bakım faaliyetlerin belirli zamanlarda düzenli olarak yerine getirilirken, tamir faaliyeti ise sistemin kesin olarak arızasının doğrulanmasından sonra ortaya çıkmaktadır. Arızanın giderilmesinin yanında arızaya nedenlerinin teşhisi de önemlidir. Arıza bulma ve giderme ile ilgili çeşitli yaklaşımların , insan yeterlilikleri, kısıtlamalar, ve temayüller göz önüne alınarak yapılan değerlendirmeler¹⁰ sonucu:

I. Yarıya bölme yaklaşımı:

Kullanılan en eski teknik olup arızanın alternatif kaynaklarına dayalı olasılık bilgilerinin bulunmaması halinde hatanın yerini tesbit için geliştirilmiş stratejidir. Teknik, teknisyenin sistemi gitikçe yarıya bölerek sistem içindeki yerini tesbit esasına dayanır. Teknisyen test noktasına, diğer tarafta kalan test noktalarını yaklaşık olarak ikiye bölerek ulaşır.

⁹ G Anders., "Human failure in determining an optimal inspection interval for equipment used in emergency conditions", IEEE Transactions on Systems, Mans & Cybernetics, Sayfa: 290,295 (1985)

¹⁰ N. Morris & W Rouse., "Review and avaluation of empirical research in troubleshooting", Human Factors, Vol:27, Sayfa:503, (1985)

II. Arıza Oranı Yaklaşımı:

Bu model arıza oranı ve modulün test maliyetini göz önüne alarak teknisyeni muayene edeceği parçanın belirlenmesi esasına dayanır.

h_i : Cihazın arızalanması halinde i. bileşen veya modulün arıza oranı

c_i : Test maliyet veya zamanı ise

Teknisyen en yüksek $\frac{h_i}{c_i}$ değerine sahip elemanı öncelikle test eder.

III. Baye's yaklaşımı:

Bu yaklaşım, bakım teknisyeninin yazılı prosedürler ve alacağı eğitime dayalı olarak sıradan hataları bulacak şekilde yetiştirilmesidir. Eğer hata, eğitim veya prosedürlerde yer almıyor ise durum zorlaşır. Bireyleri her olası sistem arızasının analiz ve teşhis edecek şekilde eğitmek mümkün değildir.

Bireysel uzmanlar yetiştirmektense teşhise dayalı bilgileri bilgisayar yardımı ile merkezi hale getirdikten sonra emarelerin bilgisayara verilip uygun prosedürün alınması mümkündür.

Bayesian yaklaşımında teşhis ve arızanın giderilmesi için herhangi bir kişinin gözleyebileceği emareler ve arıza nedenleri mevcuttur.

Eğer bir seri arızaya dayalı olarak emareler ve nedenleri toplanır, her sınıf nedenin bağlı frekansları tesbit edilir ise belirli emareye dayanarak nedeninin olasılığı tesbit edilebilir.

M_i : Olası arızalar, S_j : Gözlenebilir ilgili emareler ise

$Prob\{M_i\}$ = i. arızanın sistemde olma olasılığı

$Prob\{S_j \setminus M_i\}$ = Eğer sistem M_i arızasına sahip ise S_j emarelerinin sistemde olma olasılığı olup, S_j emareleri olması halinde M_i arızasının, bozukluğunun olasılığı:

$$Pr ob\{M_i / S_j\} = \frac{P\{S_j / M_i\} \cdot P\{M_i\}}{\sum_k P\{S_j / M_k\} P\{M_k\}}$$

Eğer arızanın maliyeti para veya zaman olarak biliniyor ise $Prob\{S_j \setminus M_i\}/c_i$ oranı en yüksek olan arız birinci öncelik ile icra edilir.

IV. Yanlış gözlem ile teşhis:

Arıza tesbit ve giderilmeleri ile ilgili yaklaşımlar test cihazlarından bilgileri doğru bir şekilde tesbit edildiğini kabul eder. Halbuki, test işlemi alet arızası veya **insan hatası** nedeniyle yanlış yapılmış olabilir. Bu durumda arıza giderilemez ise test işleminin yeniden yapılması gerekir.

Yanlış gözlem durumunda arızanın tesbiti için en uygun yolun belirlenmesi istendiğinde tesbit olasılığı kavramı ortaya çıkar. Tesbit olasılığı, doğru test yapıldığında arızanın nedenini bulma olasılığıdır. Gözlem mükemmel olmadığı için arızanın tesbitinden önce sonsuz miktarda test yağımı gerekebilir.

p_i : i. arızanın tesbit olasılığı

z_i : i. arızanın daha önce kaç kez test edildiği ise

Teknisyen, beklenen araştırma maliyetini en aza indirgeyecek şekilde en yüksek önceliğe sahip indeksi, $Y(M_i)$, seçer.

$$Y(M_i) = P\{M_i / S_j\} (1 - p_i)^{z_i} \cdot p_i / c_i$$

14.1.2. Etkin Bakım ve İdame Özellikli Tasarım:

Sistem performansı ve hazır bulunuşluğu gerekli bakım miktarı ve gerçekleştirilen bakımın etkinliği ile ilgilidir. Bakım, tüm insan-makina ara kesitini kapsadığında bakım ve idameye yönelik tasarım entegre edilmiş insan hatası tekniklerini de içermektedir.

Bakıma yönelik tasarım belirli prosedürlere dayanmadığı için ilimden ziyade sanatsal özellik taşımakta olduğu da tartışılabilir¹¹. Genel olarak göz önünde bulundurulması gereken hususlar:

a. Atmosferik Ölçüler:

Bir parçanın tamir edilebilmesi için erişilmesi gerekir. Erişilemezlik en basit görevi bile zorlaştırır. Operatörler bazen büyük makinelere tırmanmak zorunda kalırlarken, küçük elektronik aletin içine parmaklarını sokmak zorunda kalırlar.

Vücut veya uzuvlara uygun atmosferik ölçülerin yanında luzumlu aletlerin kullanımı içinde yeterli sahanın bulunması gerekir. Bileşenlerin sökülmesi ve takılması için yeterli boşluk, çalışılan sahanın görülebilme imkanının olması gerekir.

¹¹ Kyung S. P., op.cit., s.281

b.Bilgi görüntüleme ve bakım kontrolleri:

Bakım operatörü bakımını yapacağı belirli tipteki makine hakkında bilgileri içeren detaylı manuele gereksinim duyar. Bu bilgiler; performans karakteristikleri, bileşenleri, olası arızalar ve bakım prosedürleri olabilir. Yetersiz dizayn edilmiş manuel hataların ve bakım zamanının artmasına neden olur. Bakım etiketlerinin kullanımı belirli birimlerini parçaların, kontrollerin, test noktalarının tanınmasına olumlu katkı sağlar.

Bakım aşamasında sistem karakteristiklerinin teşhisi normal faaliyetin sürdürüldüğü ana nazaran daha önemli olup daha detaylı görüntülenmelerini gerektirebilir. Bu an ancak uygun görüntü birimlerinin seçimi ile gerçekleştirilir.

c.Konnektörler ve Bağlama Elemanları:

Konnektörlerin ve bağlama elemanlarının seçimi ve tasarımı bakım ve idamede olduğu kadar güvenilirlik ve imalat giderleri açısından da önemlidir.

I. İrtibatlama ve sökme kolaylığı: Kolay bir bakımın gerçekleşmesi açısından,

- Fiş şeklindeki elektriksel konnektörler, vidalılara nazaran daha iyidir
- Altıgen kafalı, tornavida yarığı içeren vida ve civatalarla sürat daha fazladır
- Kanatlı somunlar daha kolay sökülür

II. Yanlış bağlantının önlenmesi: Konnektörlerin yanlış yönde veya yanlış soketlerin kolayca bağlanmasını engelleyen çeşitli metodlar mevcuttur. Bunlar:

- Farklı ölçülerde konnektör kullanımı
- Renk kodlamaları
- Farklı uzunlukta kablo kullanılarak konnektörün yanlış sokete erişiminin önlenmesi
- Konnektör ve soket içi ayar pinleri olabilir.

d.Örnek Tasarım Prensipleri:

I. Elektrik ve Mekanik Tasarımcıları Açısından Bakım ile İlgili Prensipler:

Elektriksel ve mekanik tasarımcılarının faaliyetlerin esnasında aşağıda belirtilen soruları¹² göz önüne almaları ve olumlu cevap verecek şekilde tasarımlarını gerçekleştirmeleri bakım açısından daha uygun tasarımların ortaya çıkmasını sağlar. Bu durumda daha az bakım hatalarının beklentisi için olunması doğaldır.

¹² W.G Ireson., *Reliability Handbook*, (New York: Mc.Graw-Hill, 1966), ss.11/2.

Elektriksel tasarımcı açısından:

- Birim özel bir taşıma koluna ihtiyaç duyuyor mu?
- Birimin sisteme tesisinden sonra ne gibi ayarlamalara gerek duyulmaktadır.
- Periyodik test ne sıklıkta gerekli olacak ?
- Test noktalarına erişilebiliyor mu ?
- Tüm birbirine bağlantılı devreler aynı ünite içinde mi yer alıyor ?
- Yüksek arıza oranına sahip parçalara erişim kolay mı ?
- Panel gösterge lambalarını değiştirmek kolay mı ?
- Bakım aşamasında ara kabloların kullanımına devreler müsait mi?
- Gerekli bakım test aletlerinin miktarı düşük tutulmuş mu?
- Erken eskime özelliğine sahip bileşenler uygun olarak belirlenmiş mi?
- Fiş uçları belirlenmiş mi?

Mekanik tasarımcı açısından:

- Özel bakım ortamı ve imkanları gerektiren maddelerin tasarımı en az olacak şekilde mi yapılmış ?
- Tüm parçalar etkin bakım çalışması için erişilebiliyor mu ?
- Tüm ayarlar atelye bakımı düzeyinde mi yapılacak ?
- Test ve bakım personeli için gerekli koruma sağlanmış mı ?
- Test noktalarına erişilebiliyor mu ?
- Bakım çalışmaları ve ayarlamalarda montaj ve sökme işlemleri karmaşıklığını ortadan kaldıracak şekilde adımlar belirlenmiş mi ?

II. Bakım ve İdame Mühendisleri:

Tasarım aşamasında bakım ve idame mühendisleri aşağıda belirtilen sorulara cevap aramalıdır:¹³

- Atelye de cihazın bakımını kim yapacaktır ?
- Bakım personelinin ne gibi beceriler beklenmektedir ?
- Halihazırda yürütülmekte olana faaliyet ile ihtiyaç duyulan bakım olayı nasıl entegre edilecektir ?
- Cihazın planlı bakımı için nelere gereksinim vardır ?
- Bakım ve garanti planı nedir ?

¹³ Downs W.R., "Maintainability analysis versus maintenance analysis", *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, IEEE. ss.476-481. New York (1976)

- Faaliyet planı nedir ?
- Ne tip cihaz arızaları aranmalıdır ?
- Bakım yaklaşımında güvenilirlik ve emniyet yönünden duyulabilecek endişeler ?
- Bakım maliyet etkinlik konsepti nedir ?
- Belirleme, öngörün ve kontrol gerektiren idame performansı parametreleri nelerdir ?
- İdame hata olasılıklarının en aza indirgenmesi için gerekli olan hangi tasarım özellikleri belirlenecektir ?
- Olası arıza riskleri, muhtemel nedenleri ve sonuçları nelerdir ?
- Atıl zaman sınırlarına uyum için gerekli tasarım özellikleri nelerdir ?
- Atıl zaman limitleri içindeki optimum tamir düzeyi nedir ?

14.1.3.Bakım Prosedürleri:

Bakım yordamlarının hazırlanması aşamasında insan ve makina güvenilirliklerini arttırmak, bakımın daha etkin yapılabilmesini sağlamak açısından aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmesi yararlıdır.¹⁴

- Teknisyenler tarafından alınacak karar miktarını en azda tut.
- Bakım prosedürlerini etkinliğini kaybetmeksizin en kısa şekilde yap
- Adım-adım yaklaşımı takip et
- Bakım personelinin, yüksek voltaj gibi, hassas parça veya tehlikeli ortamda çalışmalarından mümkün olduğunca kaçın
- Prosedürlerde cihazları açma ve kapatma aşamalarının açık olarak anlatılmış olmasına dikkat et.
- Prosedürleri kesin sonuçlara erişecek ve arıza tanım ve gideriminde sistematik olmasını sağla
- Prosedürleri mümkün olduğunca basit yap
- Karar vermedeki seçenekleri mümkün olduğunca azalt.

Şema, elkitabı ve manuelleer çalışma ortamında kolaylık sağlayan yardımcılardır. Bunların ve benzeri yardımcılardan hazırlanması ve kullanımı sistem güvenilirliğinin ve insan

¹⁴ Joint Army-Navy-Air Force Steering Committee. Designing for maintainability. *Human Engineering Guide to Equipment Design*. John Wiley & Sons, New York (1972)

hatalarının azaltılması açısından önem taşır. Yardımcıların hazırlanmasında takip edilmesi gereken adımlar¹⁵ aşağıdaki şekilde özetlenmektedir.

- 1.Adım: Kişi tarafından yapılacak tüm olası faaliyetleri kapsayan listeyi geliştir.
- 2.Adım:Her faaliyet için adım-adım yaklaşımını geliştir.
- 3.Adım:Tüm faaliyeti göz önüne alarak her adım için iş yardımcısında olması gereken bilgileri saptar
- 4.Adım:Bireyin iş yardımcısında bulunan bilgilere erişim ve kullanım yollarını belirler
- 5.Adım:İş yardımcısını test eder
- 6.Adım:Gerekli değişiklikleri yapar ve iş yardımcısına son halini verir

14.1.4.İnsan Gücü Gereksinim Modelleri:

Model I. Bu modelde ¹⁶ bir konfigürasyon için gerekli toplam teknik insan gücü gereksinimi, M, konfigürasyonu oluşturan her cihaz için gerekli insan gücünü göz önüne alarak aşağıdaki formül yardımıyla bulunmaktadır.

$$M = \sum_{i=1}^k m_i$$

m_i , i. cihazı desteklemek için gerekli tahmini insan gücü gereksinimi olup, k ise konfigürasyonu oluşturan cihaz, teçhizat adedidir. i. cihaz veya teçhizatı desteklemek için gerekli insan gücü ise :

$$m_i = T_0 \cdot N \cdot \beta$$

N: Cihaz veya taçhizatın miktarı, T_0 : Cihazın günlük, aylık v.b. çalışma süresi ve β ise adam.saat / cihaz.saat miktarındaki yetersizlik olarak ele alınmakta ve aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$\beta = \frac{\theta_1}{\alpha_1} + \frac{c_1 \cdot \theta_2}{\alpha_2} + \frac{c_1 \cdot \theta_3}{\alpha_3}$$

θ_1 : Tamire kadar ortalama zaman (adam-saat)

α_1 : Arızaya kadar ortalama zaman (cihaz-saat)

¹⁵ J.D.Folley & S.J.Munger, *Design of Information Job Performance Aids*, Aerospace Medical Research Laboratories Report, Ohio (1961)

¹⁶ Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment, *Reliability of Military Electronic Equipment*, U.S.Government Printing Office, Washington D.C. (1957)

θ_2 :Arızayı durdurmaya yönelik tüm fonksiyonların yerine getirilmesi için gerekli zaman

α_2 :Bir önelyici bakım için gerekli cihaz çalışma süresi

θ_3 :Sistemin yeterli çalışmasının tesbiti için gerekli süre

α_3 :Cihazın düzgün çalıştığına doğrulanma faaliyetleri arasındaki zaman

Model II. Bu model bakım faaliyetlerinde istihdam edilecek optimum personel miktarının tesbiti için kullanılabilir. ¹⁷ Eğer n: Bakıma ihtiyaç duyabilecek cihaz-teçhizatı oluşturan eleman miktarı, m: Bakım personeli miktarı ise tamirde veya tamir için bekleyen cihaz veya teçhizatın bulunmamasının olasılığı, P_0 , aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$P_0 = 1 - \sum_{i=1}^n P_i$$

P_i : Cihaz veya teçhizatın i. elemanının bakım için bekleme veya tamirde olma olasılığıdır. Bu olasılık, $0 \leq i < m$ için, bir başka deyişle cihaz miktarının eleman miktarında az olması durumunda, aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$P_i = P_0 A_1 \left(\frac{\lambda}{r} \right)^i, \quad A_1 = \frac{n!}{i! \cdot (n-i)!}$$

λ :Cihazın ortalama arıza oranı

r: Ortalama servis oranı

Benzer şekilde $m \leq i \leq n$ için, bir başka deyişle personel miktarının fazla olması durumunda :

$$P_i = P_0 A_2 \left(\frac{\lambda}{r} \right)^i \cdot \frac{1}{m^{(i-m)}}, \quad A_2 = \frac{n!}{m! \cdot (n-i)!}$$

şeklinde hesaplanabilir. Bakım için bekleyen veya bakımdaki cihaz eleman adedinin beklenen miktarı:

$$N_e = \sum_{i=0}^n i \cdot P_i$$

Tamir ve arızanın toplam maliyeti ise aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$C_t = N_e \cdot k_{md} + m \cdot R_m$$

¹⁷ R.Reed, Plant Location, Layout and Maintenance, Irwin Inc., Homewood, Illinois (1976)

k_{md} : Her makina için çalışmadığı zamanın saat başına maliyeti

R_m : Bakım işçiliğinin saat başına maliyeti

14.1.5. Bakım Azalma Eğrisi:

Tekrarlı görevlerde öğrenmeye ilişkin insan kapasitesi öğrenme eğrisi ile tarif edilir. Genelde imalat yönelik faaliyetlerde kullanılan öğrenme eğrisi bakım faaliyetlerinde ise bakım azalma eğrisi olarak bilinir. Bakım çalışmaları ve insan gücü araştırmalarında oldukça faydalı olup faaliyet sürerken herhangi bir tekrarlı bakım faaliyetinin gerçekleştirilmesi için gerekli olan zamanın azaldığını göstermektedir. Bakım faaliyetinin her tekrarlanışında zaman azalmaktadır. Zamanın azalma nedeni geliştirilen metod ve yordamların, çalışma ortamının, işçinin işe aşına olması v.b. nedenlerin sonucudur. Eğri denklemi:¹⁸

$$T = \theta \cdot M^{-\beta}$$

β , öğrenme oranı üssü, M gerçekleştirilen bakım faaliyeti miktarı, T her bakım olayı için bindirilmiş ortalama zaman, θ ilk bakım faaliyetinin gerçekleştirilmesi için gerekli olan zaman.

14.2.KALİTE KONTROL FAALİYETLERİNDE İNSAN GÜVENİLİRLİĞİ:

İmalat sanayiindeki en önemli faaliyet sahalarından biri de ürünlerin kontrollüdür. Kontrol işlemlerinin sağlıklı veya hatalı olarak yürütülmesi ürünün kalitesini etkilemesinin yanı sıra kurumunda başarısını da etkiler. Ürünlerin tetkiki faaliyeti büyük oranda insanların algılama yeteneklerine bağlı olup muhtemelen tamamen otomatize edilemeyecektir. Ürünler karmaşıktıkça ve müşterilerde estetik arayışı bulunduğu müddetçe insanlar tarafından gerçekleştirilecek tetkik, muayene, kontrol işlemleri daha da önem kazanacaktır.

14.2.1. Muayene ve Muayene Hataları:

a.Endüstriyel kalite kontrolüne yönelik muayene ve tetkik:

Kalite kontrolü, tasarım standartlarına bağlı olarak belirli kusur yüzde sınırları arasında bulunan ürünlerin tesbiti için yapılan ürüne yönelik bir faaliyettir. İyi bir kalite kontrolü kabul edilmeyen, tamir için geriye dönen parça miktarını azaltır. Aynı madde üzerinde tekrar çalışma ilave insan gücü, makina kullanımını ve ilave materyal sarfını gerektirir.

¹⁸ Dhillon B.S., *Human Reliability With Human Factors*. (New York :Pergamon Press, 1986), s.150,

Endüstriyel kalite kontrolün bir parçası olarak, tetkik bazı standartlara dayanarak bir maddenin kalitesini tesbit sürecidir. Tetki aşağıda belirtilen iki önemli fonksiyonu yerine getirir:

I. Kabul Kontrolü: Süreç içinde hatalı olanların daha fazla ilerlemesine mani olmak. Amaç hatalı ürünlerin çıkarılması olup bazı seçilen maddelerin analizine dayanarak bir ürünün kabul veya red edileceğinin tesbit edilmesidir.

II. Süreç Kontrolü: Kalite performansı yönünde ürünün belirli karakteristiklerine ait verileri toplayıp üretim faaliyetine geri besleme yapmak.

İster gözle, bir takım göstergelerin okunmasıyla, kalibrasyonla ister otomatik kontrol cihazı ile yapılınsın madde üzerinde karar veren yine insandır. Otomatik kalibre cihazları bile elle kalibre edilmekte olup bu yine devam edecektir. Kontrol; insan, insanın kullandığı alet veya cihaz, otomatik olarak yapılsa da her zaman hatanın ortaya çıkması olasıdır. Tetkik hatalarını ihmal etmek daha yüksek maliyetler ile sonuçlanır. Tüm hataları elimine etmeye çalışmak en iyi çözüm olmayıp kontrolü gerçekleştiren insanın mükemmel olmasını beklemek, ki mümkün değil, kişi üzerindeki gerilimi arttıracaktır.

Kontrollü miktarda hataların ortaya çıktığı güvenilir bir muayene ve ekonomik, istatistiksel kalite kontrol düzeni kurmak mümkündür. Bu ancak hatanın ortaya çıkması ve ölçülmesi ile mümkündür.

b. Muayene ve Tetkik Hataları:

İstatistiksel kalite kontrolünde, niteliklere(nitel) ve değişkenlere(nicel) tetkik mevcuttur. Değişken muayenesinde kişi ürünün ağırlık veya boyutları gibi karakteristiklerini ölçerken ölçüme tabi tutulan maddeler arasında yapılan ölçüm hatası iki nedene dayanır: Eğilim-Önyargı ve hassasiyet derecesi. Günümüzde digital göstergelerin kullanımı bu yönde **insan hata oranlarını** oldukça azaltmıştır.

Nitelik muayene ve tetkikinde, kişi her maddeyi alet, edevat veya ölçme aleti kullanarak, *kabul* veya *red* gibi iki veya daha fazla grupta sınıflandırır.

Çoğu durumda kişi genellikle nesnelere *red* diye işaretler veya çıkarıp atar. Gözden kaçanlar otomatik olarak kabul edilir. Tetkike tabi tutulan nesne gerçekte iyi ve kötü olabilir. Muayene elemanlarının da her bir iyi ya da kötü nesneyi kabul veya red olarak sınıflandırması mümkündür. Bu durumu aşağıdaki tabloda¹⁹ gözlemek mümkündür.

¹⁹ Kyung.S.Park, op.cit.,s.271

TABLO 3

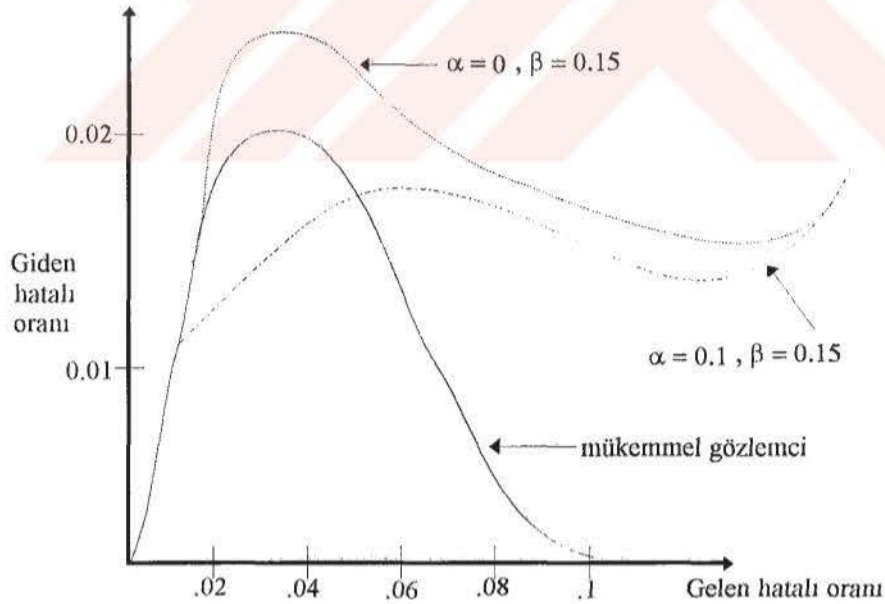
Nicelik muayene ve tetkik sonuçları

Karar	Muayeneye tabi tutulan nesne	
	İyi	Kusurlu
Kabul	Hata yok	Gözden kaçma(2.tip hata)
Red	Yanlış Alarm(1.tip hata)	Hata yok

Her tip muayene hatasının maliyete katkısı mevcuttur. Ancak, normal durumda olan bir maddenin hatalıymış gibi red edilmesi (1. tip hata), ardışık icra edilen seri, çok aşamalı faaliyetlerde maliyete etkisi daha önemlidir. Eğer hatalı malın ortaya çıkma oranı q ve 1. tip hata α , 2. tip hata β ise kalite kontrolünden geçen maddenin hatalı olma olasılığı aşağıdaki formül ile bulunur.

$$Pr ob\{H|A\} = \frac{\beta q}{[(1-\alpha)(1-q) + \beta q]}$$

Basit bir örnekleme ile yapılan çalışmada muayeneye gelen maddelerin gerçek kalitesi, muayene noktasını terk eden maddelerin ortalama kalitesi ile ilişkilidir.²⁰



²⁰ Collins R., V, case ve 6. Bennett, *The effects of inspector error on single sampling inspector plans*, Int. S. Production Research, 1973, c.11, ss. 289-298'den alan Kyung S. P., İbit., s.271

²¹ Kyung S.Park, op.cit., s.272

Kesiksiz çizgi mükemmel bir kalite kontrol elemanın performansını göstermektedir. Kalite kontrol elemanının performansı her iki tip hata azaldıkça artmaktadır.

14.2.2. Muayene elemanı ölçülendirilmesi

Çoğukez, muayene elemanının mevcut şartlarda ölçülendirilmelerine ihtiyaç duyulur. Bu işlem genellikle bilinen defolu veya hatalı ürünlerin muayene sürecinden geçirilmesi ile yapılır. Hatalı ürünler, muayene elemanı tarafından görülmeyecek şekilde işaretlenir.

TABLO 4

Örnek Muayene Elemanı Performans Değerleri

<u>Madde Tipi</u>	<u>Şartlar</u>	<u>1. Tip Hata %</u>	<u>2. Tip Hata %</u>
Lastik	Normal	3	8
TV Ekranı	Test	11	9
Baskılı devre	Test	3	10
Entegre devreler	Test	2	23
Cam Ürünler	Test	10	9
Cam Ürünler	Normal	4-8	10-20
Makina Parçaları	Test	6	25
Madeni Para	Normal	1	45
Örgü giyim	Normal	0	54
Akustik Tuğla	Test	5	22
Un Mamülleri	Test	3	37
Tavuk Ürünleri	Normal	0	29-44
Diş Radyografisi	Test	41	15
Çene Radyografisi	Test	2	32

*K.S. Park, Advances in Human Features/ Ergonomics, S.273, Newyork; 1987'den adapte edilmiştir.

TABLO 4, Telafi edici faaliyete girişmeden önce muayene elemanının performansına ilişkin gerçek örnekleri içermektedir. Tüm test işlerinde ehliyetli personel kullanılmış olup şartlar sütunundaki *Normal*: Teste tabi tutulan kişinin bunu bilmediğini, *Test*: Teste tabi tutulan kişinin bunu bildiğini ifade etmektedir.

Sinyal Tespit Teorisi:

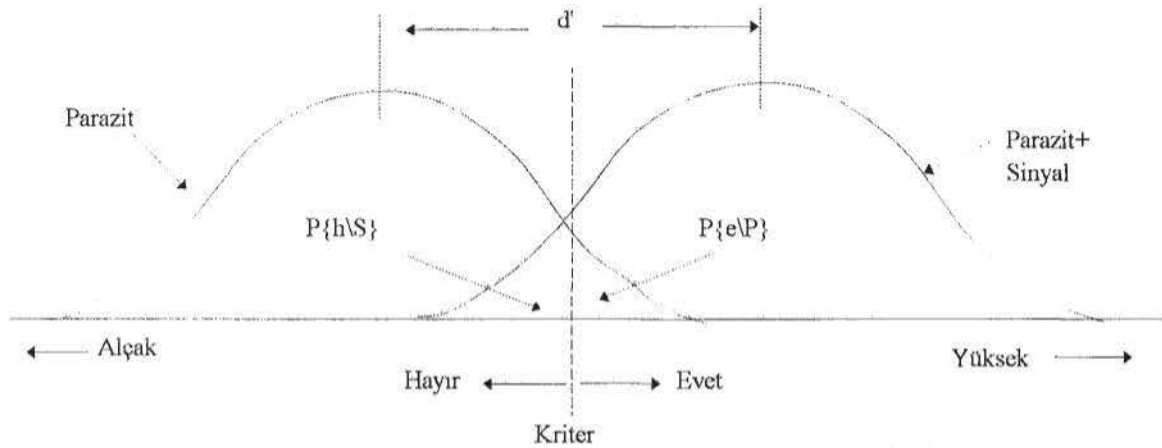
Çoğu ortamda anlamlı uyarıcı araya giren parazit veya gürültü ile beraber ortaya çıkabilir. Parazit veya gürültü uyarı sinyali; radar ışık parlaması veya muayene edilen parçadaki kusur şeklinde olabilir. Bu parazitin uyarıcının tesbiti üzerindeki olası etkiler *Sinyal Tesbit Teorisi* (STT), ile açıklanmaktadır.

İki sinyal verildiğinde, performansın sinyalleri arasındaki açıklık, netlik farkından mı yoksa kişinin tesbite ilişkin tutum ve davranış farklılığından mı kaynaklandığını belirlemek zor olur.

STT, gözlemci tutumunun ve sinyal açıklığının etkisini bir yana bırakıp herbiri için ayrı ayrı bağıl değer belirlenmesini önerir. STT, sinyalin olup olmadığı hususunda karar verecek olan gözlemcinin bilgileri, rastgele parazit veya gürültünün bulunduğu bir ortamda elde ettiğini farz etmektedir.

Parazit doğal ortamın bir parçası olabileceği gibi gözlemcinin sinir sisteminden de kaynaklanabilir. Gözlemci üzerindeki etkisi, duyuşal tahrik, boyutsuz değişken olarak göz önüne alınır.

Yoğunluğunu rastgele değiştiği gürültü /parazit ortamında işitmeye dayalı bir sinyalin arasına ortaya çıktığını varsayınız. Gürültünün ve ilave olarak sinyalin rastgele dağılımları benzer fakat ortalamaları farklıdır. Şekil 8.3'de muayene görevinde, evet veya hayır diye karar verecek örnek bir kitlenin davranışını sergilemektedir. İki dağılımın ortalamaları arasındaki fark d' , sinyalin tesbit edilebilirliği olarak adlandırılmakta ve sinyal temizliğinin ölçütü olarak ele alınmaktadır. Her bir d' için sinyal-parazit oranı tesbit edilebilir.



Şekil 10.3-Ses yoğunluğunun parametre olarak kullanıldığı STT²²

²² Kyung S.Park, ibid., s.273

Çok düşük ve çok yüksek kesafette, bindirilmiş bölgelerde sadece sinyal veya sadece parazitin mi mevcut olduğu kestirilememektedir.

Parazitteki sürekli değişim nedeniyle, sinyal ilave edilmiş olsun veya olmasın bazı parazit sinyalmiş gibi bazende sinyal gözlemciye parazitmiş gibi gelebilir. Akıllı bir gözlemci, *evet* kararını vereceği bir nokta belirleyebilir. Kriter, kişinin sinyalin ortaya çıktığı yargısına varabileceği, sesin sinyal ve parazite benzeme oranı belirleyecek bir karar verme noktasıdır.

Sinyalin var olup olmadığına ilişkin olası dört cevap aşağıdaki tabloda özetlenmektedir.

TABLO 5

Sinyal tesbitinde olası cevap seçenekleri

<u>Cevap</u>	<u>Parazit (N)</u>	<u>Sinyal (S)</u>
Hayır	Hata yok: $P\{h\backslash N\}$	Kaçırma: $P\{h\backslash S\}$
Evet	Yanlış ikaz: $P\{e\backslash N\}$	İsabet: $P\{e\backslash S\}$

Şeki 8.3'den de görülebileceği gibi %100 performans mümkün olmayıp seçilen kriterde hata tipleri üzerinde aleni bir etkiye sahiptir.

Eğer gözlemci olabildiğince çok sinyali tebit etmek istediğinde, kriteri sola kaydıracak fakat bu durumda yanlış ikaz miktarı artacaktır. Eğer gözlemci sinyalin varlığından emin olarak karar vermek isterse kriteri sağa kaydıracak, isabet oranı, isabet oranı doğru olarak tesbit edilen sinyal miktarı azalacaktır.

Bu nazari örnekte, sinyal, arka plandaki bir gürültü ile ortaya çıkmaktadır. Aynı kavramlar aynı kesafette, arıza tesbit sürecinde diğer tip sinyal veya gürültüye adapte edilebilir. Çoğu sinyal tesbit ortamı deneysel analize müsait olmayıp STT uygulanırken :

1. *Tesbit edilebilirlik* : Sinyal gürültü dağılımından ayrılmalıdır. Anlamli nesnelere açık olarak ayırt edilebilmeli parazitten, arka plan gürültüsünden farklı olmalıdır.
2. *Kriter*: Bazen üst üste bindirmelerden kaçınılamaz. En ekonomik karar hertip hata ile ilgili maliyeti dengeleyen nokta seçilmelidir.

14.2.3.Hataların Tesbit Edilebilirliği

Muayene performansını etkileyen en önemli faktör görsel ve zihinsel olarak farklılıkları yakalayabilmektir. Zorluk, hataların boyut ve tabiatı, aydınlatma, arıza uyarısını tesbit için

taranması gereken uyarıcıların toplam miktarı gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Zorluk arttıkça performans düşer.

•**Aydınlatma:** Muayene çoğu görevler gibi karar vermede duyuşsal ve motor tepkileri içerir. Görme tipik bir algılama yolu olup öncelikle muayene elemanın görsel olanağı arttırılmalıdır. Muayeneye tabi tutulan nesnelere rahat etmeyen düzeyde yerli aydınlatmaya tabi tutulmalıdır. Renkli ışık kullanımı bazı renk uyumunun tesbitine dayalı faaliyetlerde daha uygun olabilir.

Eğer büyüteç kullanılır ise, cismin uygun derinliğe süratle yerleştirilmesi için alet kullanılmalıdır. Maske kullanımı, muayene elemanın fazla ışıklandırılmış şeyleri görmesi gerektiğinde yararlıdır.

•**Muayene Süresi:** Muayeneye tabi cisimlerin fazlalığı, kalabalık ortamda muayene, muayene performansını düşürür. Gereklili muayene süresi küçüldükçe, muayene hatalarının üşsel olarak arttığı tesbit edilmiştir. Muayenenin etkinliği nesnelere ortaya çıkış oranıyla, görevin karmaşıklığı ve defonun barizliği ile ilişkili olup muayene süresi ve muayene hatalarının etkinliği arasındaki tercih için derinlemesine analiz gerekir.

•**Duravan e hareketli nesnelere:**

Gözlem faaliyetleri, muayeneye tabi tutulan nesnelere hareketsiz iken, bazıları da meyve ve cam eşyalar gibi konveyör üzerinde hareket ederek gerçekleştirilir. Hareketli nesnelere muayenesi dinamik görsel isabeti gerektirdiğinden performansı düşürmekte olup mümkün olduğu oranda durağan şekilde muayene tercih edilmelidir.

•**Hata Frenkansı:**

Dikkat testi, tesbit edilecek sinyal miktarı arttıkça, doğru tesbitlerin miktarının da arttığı tesbit edilmiştir. Hataların miktar ve özellikleri, muayene yapan kişinin gözlem esnasındaki beklentilerini etkilemekte olup, nadiren ortaya çıkan hatalar gözden kaçabilir.

Kişi belirli miktardaki hata tipini aklında tutabileceği için, olası defoların miktarı fazla ise çokça ortaya çıkanlar üzerinde konsantre olunmaktadır.

•**Hata Tesbitinin Otomasyonu:** Defoların araştırılması ve tesbiti bazen otomatik olarak yapılabilir. Hatanın tesbitinden sonra karar verme de kişiye bırakılabilir veya otomatik hale getirilebilir. Test cihazları veya insan arasındaki tercihte maliyet, hassasiyet, yeterlilik gibi faktörler göz önüne alınır.

14.2.4.Karar Verme :

•*Limit standartları ve Numaralar:* Amaç, karar hatalarını azaltmak olup, ilk gerekli olan her defoya ilişkin standartların açık olarak tesbit edilip kişinin kullanımına sunulmasıdır. İnsanlar, görelî mukayeselerde daha başarılıdırlar. Limit standartları ve örnekleri bu prensibe dayanmaktadır.

Bir limit numunesi, bir maddenin kabul edilebilir küçük çapta hatalar taşısa da sahip olduğu diğer özelliklerine dayalı olarak kabul edilebilir örneğidir. Faaliyet esnasında numuneden daha kötü durumda olanların red edilmesine ilişkin talimat ve numune muayeneyi yapan kişilerin kullanımına sunulur.

•*Karar Verme Yardımcıları:*

Limit standartları tebit edildikten sonra her türlü ölçü aleti ve cihazın kullanımı mukayesenin doğruluğunu arttıracığı için standartları göz önüne alınarak ölçü aletlerinin geliştirilmesi, alet içinde red ve kabul bölgelerinin oluşturulması performansı artırır.

•*Otomatik olarak karar verme :* Muayenede karar verme görevi yarım ve tam otomatik ölçü aletlerinin kullanımı ile basite indirgenebilir. Yarı otomatik ölçü aletlerinde ölçüm sonuçları kişi tarafından yorumlanırken, tam otomatik ölçü aletleri ölçüm sonuçlarına ilişkin verileri yorumlayarak kabul veya red kararını verir.

14.2.5.Personel Kalitesi ve Eğitim:

Endüstriyel bir faaliyetin gerçekleştirilmesinde ya işi yapan kişi değiştirilerek işe uydurulur ya da iş kişiye uygun hale getirilir. Muayene işlemi bazı kişisel özellikler gerektiriyor ise en uygun yol bu özellikleri taşıyan kişilerin birtakım testlerden geçirilerek seçilmesidir.

Kişinin seçim ve eğitim ile değiştirilmesinin işin veya ortamın değiştirilmesine nazaran daha az etkin olduğu saptanmış, zeka, çevre ile işe karşı ilgili olma veya cinsiyet gibi değerler ile daha iyi tetkik ve muayene arasında sabit bir korelasyon kurulamamıştır. Daha iyi karar vericilerin seçimine ilişkin etkin testler bulunmayıp kişilerin seçim aşamasından sonra inceleyecekleri kalite faktörlerine ilişkin bir seri eğitimden geçirilmeleri yararlıdır.

14.2.6.Davranışsal ve Organizasyonel Faktörler:

•*Adımlama:* Muayene ardışık olarak adımlı ve adımsız olarak iki tipte yapılabilir. Yürüyen bir bant veya benzer bir cihaz üzerindeki adımlı gözlemde kişinin yaptığı işin hızı üzerinde kontrol yetkisi ya çok az veya yoktur. Muayene görsel ve hatırlamaya dayalıdır. Konveyörlü muayene faaliyetinde hız ve doğruluk arasındaki tercih önemli olup genellikle bir maddenin muayenesi için gerekli zamanın tolerans boyutları fazladır. Doğru ortalama hızdan ziyade bu ortalama hıza esneklik kazandıracak sapma miktarları hız tayininde önemli olacaktır. Bu nedenle bazı durumlarda, maddenin özelliklerine bağlı olarak, konveyörle adımlandırılmış performansın aynı hızda adımlandırılmamış performansa nazaran daha uygun olduğu gözlenmiştir.

•*Kişisel Baskı:* Endüstriyel kalite kontrol uzmanları karmaşık sosyal ve organizasyonel baskılara maruzdurlar. En temel organizasyonel problem, kişilerin; üretimin mi? veya ayrı bir kalite kontrol departmanının mı? parçaları olduklarıdır. Üretim ve kalite kontrolün ayrılması performansı arttıracaktır.

Üretimin kalitesinin artması iyi bir geri beslemeyi gerektirir. Yüksek oranda red, üretimi ve ilgili herkesi rahatsız edecektir. Kişinin üzerindeki kişisel baskıların derecesine bağlı olarak, bazı elemanlarda normal şartlarda hiçbir baskı olmadığı zaman red edilmesi gereken parçaların geçirilmesi yönünde temel temayül vardır. Bu durum, eğer muayene ve karar büyük oranda muayeneyi yapan kişinin kanatine dayanıyor ise hatalı parçaların düzeltilmesi için çalışanın zamanından çalınıyor ise daha fazla ortaya çıkar.

1. ve 2. tip hataların azalmalarına bağlı olarak bazı teşviklerin yapılması kısmen yararlı olabileceği gibi performansları hakkında da geri besleme sağlar.

•*Dikkat :*Endüstriyel kalite kontrolünde, kişi standartlardan sapmayı veya hataları tesbit amacıyla sürekli gözlem durumunda bulunmak zorundadır. Ara vermeksizin uzun süreli çalışma tesbit edilen hataların miktarındaki azalma ile kendini gösterir.

Laboratuvar testlerinde yeknasak bir kontrol faaliyetinde beş dakikadan sonra performansta düşüş olduğu 20-30 dakika sonra performansın oldukça düştüğü görülmüştür. Çoğu kitaplar dikkat ve gözlemi gerektiren tek bir muayene ve tetkik faaliyetinin 20-30 dakika arasında olmasını, eğer muayene sürekli ise uygun dinlenme ve araların verilmesi gerekliliğini ifade eder.

Gürültünün performans üzerindeki etkisi, STT, daha önce incelendi. Ancak, bazı durumlarda doğru tip gürültü performansı artırılabilir, arka planda çalınan müzik performansı artırabilir.

•*Bağımlılık*:Kontrolle gelen parçaların red edilmesi gereken parça miktarlarına ilişkin normlar geliştirilebilir. Gerçek uygulamada ise defo miktarının az olması dolayısıyla kişi tarafından normda belirtilen miktarda hatanın bulunmaması endişeye sebep olabilir. Bu durumun tersi de geçerli olup beklenmeyen miktarda hatanın olması halinde muayeneyi yapan kişi çok miktarda hata nedeniyle normlara erken ulaşmanın rahatlığı içinde hatalı parçaların da geçmesine sebep olabilir.

•*Birden Fazla Eleman*:

İki veya daha fazla elemanın aynı anda çalışması performansı artırabilir. Fakat, ilave kişi maliyetleri ile hatalı parçaların tesbitindeki artışın sağladığı ekonomik yarar mukayese edilmelidir.



15.BİLGİSAYAR ORTAMINDA İNSAN PERFORMANSI GÜVENİLİRLİĞİ

15.1.İNSAN BİLGİSAYAR ETKİLEŞİMİ

Zaman paylaşımli bilgisayar sistemleri ve mikro bilgisayarlar, günümüzde gerek araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde gerekse iş ve ticaret ortamında standart olarak yer almaya başlamışlardır. Bu nedenle insan-bilgisayar etkileşimi; insanların nasıl hata yaptıklarının, hangi hataları yaptıklarının, nasıl tesbit ettiklerinin bilinmesi gittikçe önem kazanmaktadır.

Çoğu bilgisayar sistemlerinde kullanılan veri giriş aleti, video görüntülü terminal, kısaca ekran, beraberinde klavyedir. Klavyenin ve ekranın yüksekliği, operatörden uzaklığı, görüş açısı, aydınlık, parlaklık, titreşim v.b. verilerin daha sağlıklı ve rahat çalışma ortamında, doğruluk derecesi daha yüksek olarak girilmesi açısında göz önüne alınması gereken önemli noktadır.

Bilgisayar kullanıcıları; ilim adamı, mühendis, öğrenci, ev hanımı veya bilgisayar teknolojisi konusunda eğitim görmemiş kişiler olduğu göz önüne alınırsa, sistemin tasarımında insan-bilgisayar etkileşiminin daha bilimsel olarak konunun uzmanları tarafından ele alınmasının gerekliliği ortaya çıkar.

15.1.1.Bilgisayar Sistemi

Genel olarak bilgisayar sistemleri insan ile etkileşimleri açısından ele alınırsa:

i.Zaman paylaşımli ve etkileşimli sistemler: Geleneksel yığın işlem şeklinde bilgisayar kullanımında programın başlamasından sonra bilgisayar ile etkileşim azalmakta, bilgi işlem merkezlerinde yığılmalara sebep olunmaktaydı. Bir programın geliştirilmesi ve hatalardan arındırılması için defalarca koşturulması gerekmekteydi. Zaman paylaşımli sistemlerin geliştirilmesi ve kişisel bilgisayarların ortaya çıkması, kişilere programlarını kendilerince icra etme, hatalarının anında mesajlar ile tesbit etme, anında giderme olanağını tanıyarak bilgisayar-insan etkileşiminde süreklilik sağladı. İnsan-bilgisayar etkileşimi, bilgi ve komutları veren insan ile işlem sonuçlarını, hataları ve diğer bilgileri veren bilgisayar arasında yapılan konuşma gibi görülür oldu.

ii.Ekranlı terminal: Orjinal giriş/çıkış aygıtları daktilo tipli olup kullanıcı ve bilgisayar arasındaki dialoğu kağıda yazmaktaydı. Fakat, günümüzde ekranlı terminal;

çıktıları daha süratli sergilemesi, ucuz ve kağıt gerektirmemesi gibi nedenlerle standart terminal olmuştur. Her ne kadar ekran terminalde satır sayısı kısıtlı (20) olması nedeniyle önceki iletişim bilgilerinin kaybolmasına neden oluyorsa da bu zaaafiyet akıllı tip terminaller ile giderilmektedir. Diğer mahsuru ise görsel yorgunluktur. Eğer karakterler çok parlak, mat ve küçük ise terminal kullanıcılarının güvenilirliği ve üretkenliği etkilenir.

Ekran ve yanında bulunan basılı materyalin okunması açısından aydınlatma da önemlidir. Aydınlatma artarken elyazmalarının veya basılı evrağın okunmasını kolaylaştırırken ekranın onunmasını zorlaştırır. Işıklandırmanın oluşturduğu ekrandaki parlak yansımalar görsel rahatsızlık verebileceği gibi görsel etkinliği azaltır. Çalışma ortamının 300~500 lux şiddetinde yansımaları ve ışığın doğrudan gelmesini engelleyecek şekilde ızgaralanmış ışık düzeniyle aydınlatılmış olması tavsiye edilmektedir.¹

Halı, elbise veya ayakkabıların sentetik kumaştan yapılmaları vücutta statik elektrik toplanmasına neden olabilir.

iii. İnsan-Terminal Uyumu:

Ekran ve klavyenin gerek yüksekliği gerekse açısı etlin çalışma pozisyonu için önemli faktörlerdir. Uzak mesafedeki klavye yorulmalara sebep olurken, üst kısımdaki tuşlara erişim için bir miktar eğik olmalıdır. Mesafe en iyi görmeyi sağlayacak, ışık ve parlaklığın rahatsız etmeyeceği ölçüde olması gerekir. Genellikle kişi; ekrana, klavyeye ve dökümana kısa aralıklarla bakar. Bakış mesafeleri arasındaki farkın gözün süratle uyumu açısından da kişiyi prikolojik olarak rahatsız etmeyecek şekilde olmalıdır.

•Genellikle tavsiye edilen ölçüler:

- .Döküman, klavye, ekran görüş mesafesi 45-50cm olmalı
- .Ekran mesafesi 45-50cm olmalı, 70cm'yi aşmamalı
- .Ekran yatay ekseninin 20° altındaki görüş açısıyla rahat olarak okunabilmeli

15.1.2. Veri Giriş Aygıtları

¹ Cakir D.Hart ve T.Stewart, Visual Display Terminals, New York:Jhon Wiley & Sons, 1980

Bilgisayara veri giriş için dizayn edilmiş; klavye(keyboard), el kumanda kolu (joystick), izleme topları(traceballs), grafik tablet(digitizer), ışık kalemleri(light pen), fare(mouse) gibi çeşitli kontrol aletleri mevcuttur.

i.Alfasayısal Klavye: Her bir karakter için ayrı bir tuşun belirlendiği en popüler giriş aygıtıdır. Standart daktilo klavyesi (QWERTY) mekanik tuşların birbirine girmesini engelleyecek şekilde tasarlanmış aynı görümüm bilgisayar klavyelerine yansıtılmıştır. Her ne kadar standart klavye olarak biliniyorsa da dünyada farklı alfabelerin kullanımı , aynı alfabe kullanılsa dahi kişilerin lisanlarına uygun klavye düzenini tercihleri nedeniyle dünya standardı oluşmasını engellemektedir.

ii.Sayısal Klavye:Sıfırın en altta olduğu iki adet sayısal klavye düzeni mevcut olup biri hesap makinalarında diğeri ise tuşlu telefonlarda kullanılmaktadır.

	7	8	9		1	2	3
	4	5	6		4	5	6
Hesap makinası:	1	2	3	Telefon:	7	8	9
		0			*	0	#

Çeşitli araştırmalar sonucu telefon düzeninin hesap makinasına nazaran daha hızlı, az hata yapılan olğunu tesbit edilmiş olup, hesap makinası hata oranı %8.2 iken telefonlarda için yaklaşık %6.4 olarak belirlenmiştir.²

iii.Analog giriş aygıtları: Bilgisayarlar bazen sürekli kontrol, imleç pozisyonunu belirten verilere gereksinim duyarlar. Sürekli kontrol aygıtı olarak en yaygın el kumanda kolu ve izleme topları olup imleçin ekranda belirli yerlere getirilmesi, izleme, metin değişiklikleri, zumlama gibi amaçlar için kullanılır.

Grafik tablet ise yüzeyi üzerinde gezdirilen ucun koordinatlarını bilgisayara aktarırken, değerler imleç pozisyonu veya sayısal olarak görüntülenir.

Işıklı kalem ekran üzerinde belirli noktaları gösterip bilgisayarın o noktaların koordinatlarını tesbitine, fare ise içleçin ekranda gedirilmesine yarar. Kol yorgunluğuna sebep olmadığı için tercih edilir. Aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi verilen hedefe erişim

² R. Conrat ve A.Hull, "The preferred layout for numerical data entry keysets", *Ergonomics*, C.11(2), ss.165-173'den aktaran K.S.Park, op.cit. s.131

hızı ve hata oranı açısından en üstün performansa sahip aygıtın araştırmalarda fare olduğu tesbit edilmiştir.

TABLO I³
Analog giriş aygıtları

<u>Aygıt</u>	<u>Zaman,sn</u>	<u>Hata, %</u>
Fare	1.66	5
El kumanda Aleti	1.83	11
Oklu tuşlar	2.51	13
Fonksiyon tuşları	2.26	9

Bazı durumlarda ses veya konuşmaların doğrudan bilgisayara girdi olarak kullanılması daha uygun olabilir. Fakat, günümüzde sınırlı miktarda konuşma tanıma sistemleri mevcut olup çoğu cümlelerden ziyade bazı sınırlı sayıdaki kelimeleri tanırlar.

Veri girişlerinin sık fakat toplam faaliyetin küçük bir parçasını oluşturdukları durumlarda elle yazılmış verilerin optik karakter okuyucular ile aktarılması daha uygun dđruluk dereceleri yüksektir.

15.1.3.Çıktı Tasarım Faktörleri

1. Etkileşimli sistemlerde bilgisayar ile dialog halinde etkileşimli sistem kullanıcılarının bilgisayardan bekledikleri geri beslemeler aşağıdaki gibi özetlenebilir:⁴

-Girdinin doğrulanması:Terminal, kullanıcının girdilerini yansıtarak yazma, veri ve komut hatalarının belirlenmesine katkı sağlar.

-İşlem tamam işareti: Kullanıcı verinin gönderildiğini, alındığını, dosyalandığını bilmek ister.

-Saklı bilgiler: Kullanıcı bilgisayar sisteminde muhafaza edilen, kullanımına açık; program, derleyici, v.b. kolaylıklar ile veriler hakkında bilgi sahibi olmak ister.

-Sistemin durumu: Sistemin halihazır durumuna açıklık getirecek bilgiler.

-Yardım:Kullanıcının etkileşim halinde kararsız veya yetersiz kaldığı anda bilgisayar kendisini yönlendirici, bilgilendirici desteklemeyi yapmalıdır.

³ R. Conrat ve A.Hull, ibit.

⁴ J Gould., "Man-Computer Interfaces for information systems", *Human Engineering Lecture Notes*, Michigan Üniversitesi, 1979

-Şüpheleri ortadan kaldırma: Bilgisayar ile iletişimde kullanıcı tarafından yapılan girdi işleminde sonra sistemin girdileri anlayamaması halide durumu açıklayıcı mesajları ileterek şüpheleri ortadan kaldırmalıdır.

ii.Ekranda Menü tasarımı: Menü tip uygulamalarda kullanıcının daha etkin, hatasız ve verimli etkileşim kurabilmesi için menü tasarım, düzen ve sıralarında dikkat edilmesi gereken kurallar genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir:

-Her çerçeve bir başlık satırına sahip olmalıdır.

-Tüm satırlar, başlık hariç, sola yanaşık olmalıdır.

-Her sayfada son birkaç satır; hata mesajlarına, sistem durum mesajlarına ayrılmalıdır.

-Eğer 20 satır fazla ise çerçeveleri ekranda dengeli yayılacak şekilde tasarlayınız.

-Eğer menüde listelenecek olan nesnelere 15~20'yi aşarsa ekranda iki sütun oluşturmaya çalışınız.,

-Menüdeki nesnelere kullanım sıklıklarında ve mantıksal sırada listelenmelidir.

-Onaylanmış kısaltmaları kullanınız.Çağırışım güçlüğü yaratacak kısaltmalardan kaçınınız.

-Eğer çıktı birden fazla sayfayı içeriyor ise sayfa numarası en alt satırda sağa yanaşık olarak gösterilmelidir.

-Bir giriş çerçevesi dolduktan sonra, bilgisayar tarafından yapılması gereken işlemlerin olması halinde, kullanıcı ENTER tuşuna basıldıktan sonra yapılacak işlemler hakkında bilgi sahibi olacak şekilde uyarılmalıdır.

15.1.4.Bilgisayara dayalı bilgi sistemlerinde insan hataları:

Bilgisayara dayalı bilgi sistemlerinin geliştirilmesinde karşılaşılan en ciddi problemler günlük verilerin girilmesinde yapılan hatalar ve bunlara ilave olarak orjinal verilerin düzeltilmesinde yapılan hatalardır. Bu hataların büyük kısmı insan hatalarından ve bunların bir kısmı da hatalı sistem tasarımından kaynaklanmaktadır.

Doğruluk kontrolü, öncelikle önleme, daha sonra hataların tesbit ve giderilmesini gerektirir. Fakat çoğu bilgi sistemlerinde dikkatler hataları tesbit edecek yazılımların geliştirilmesine yönlendirilirken hataların neden oluştuğunun tesbitine yönelik çalışmalar yetersiz kalmaktadır.

Bilgi işleme açısından hataların nedeni, yanlış veya eksik bilgi şeklindeki insanın hatalı performansının neticesi olup yanlış yordam, hatalı kara, klavyedeki hatalı tuşlara basmaktan kaynaklanabilir.

1.Hata kaynakları:*Girdi* olarak adlandırılan veriler insanlar yoluyla bilgisayara aktarılıp bilgisayar tarafından işlenmelerinin ardından *çıkıtı* olarak sistemden çıkıncaya kadar her sahada hata oluşabilir.

Verilerin ortaya çıktığı ana sahaları;bilgi sistemi dışı, sistem içinde insanlar tarafından yapılan, sistemde bilgisayar tarafından yapılan hatalar olarak sınıflandırılabilir.⁵ İnsan hataları da üç sahada ortaya çıkar:

TABLO II

Bilgi sistemlerinde insan hataları,

<u>Faaliyet Sahası:</u>	<u>Yüzde:</u>
Veri hazırlama aşaması	%80
Klavye v.b. ünitelerle veri girişi	%2
Teyp ve Disk yardımıyla veri girişi	Ehliyetli personel

11.Hataları önleme: İnsanları etkileyip hata yapmalarına neden olabilecek faktörleri yedi ana katogoride toplamak mümkündür.⁶

TABLO III

Bilgisayara dayalı bilgi sistemlerinde insan hata faktörleri

<u>SINIF:</u>	<u>FREKANS</u>	<u>KONTROL</u>
Sistem tasarım	%20	Tasarımcı
Yazılı dökümanlar	%10	Tasarımcı
Eğitim	%10	Tasarımcı
İnsan-Bilgisayar etkileşimi	%10	Tasarımcı
Ortam	%10	Kurum
Kurumsal doğruluk talepleri	%10	Kurum
Kişisel faktörler	%35	Kişi

⁵ R Bailey., Human Error in Computer System, , Englewood Cliff: Prentice Hall, 1983

⁶ R Bailey., ibit.

1.Sistem tasarımı fonksiyonların uygun tahsisi hataları azaltabileceği gibi her kullanıcıya veri kodları, insan bilgisayar iletişimi, sistem raporları ve denetim hakkında geri beslenme sağlanmalı, iş tasarımı kolay ve zor işler ayrı ayrı gruplandırılmalıdır.

2.Yazılı dökümanlar tam açık ve güncel olmalıdır.

3.Eğer insanlar ne yapacakları ve en iyi nasıl yapacakları konusunda bilgilendirilmez ise hata yapma olasılıkları artar. Her yeni sistem için eğitim materyalleri hazırlanmalı ve gerek sınıf gerekse iş başı eğitimin verilmesinden kaçınılmamalıdır.

4.İnsan/Bilgisayar etkileşiminde giriş cihazlarının kalitesi, mesajlar, komut lisanları, veri kodları v.b. ayrı ayrı ele alınmalıdır.

5.Çalışma ortamı hem ısı, ışık, gürültü gibi fiziksel hem de yalnızlık, kalabalık, ikili ilişkiler ve denetim gibi sosyal olarak ele alınmalıdır.

6.Her kurumun doğrusallık düzeyleri hakkındaki talepleri farklı olup bilgi işlem sistemelerinde operatörün çabaları sıfır hataya doğru kurumca yönlendirilmelidir.

7.Fiziksel ve psikolojik gereksinimler, maharet ve bilgi, uykusuzluk, ilaç, hastalık, yorgunluk, motivasyon v.b.

iii.Hata tesbit ve düzeltme: Çoğu bilgi bilgisayara dayalı bilgi sistemlerinde hatalar ya insanlar yada bilgisayar tarafından tesbit edilirler. Çoğu kişi kendi hatalarını kendileri düzeltirken, diğerleri de kontrol ediciler tarafından tesbit edilebilir. Bilgisayarlarda ise sayısal kodlamaların doğruluk kontrolü için kullanılan en yaygın yol kontrol digitleri ve kelimeleridir.

Doğrulama işleminde aynı veriler iki kişi tarafından girilmekte ve sonradan yapılan otomatik kontolde birbirini tutmayanların doğruluğu iki kişiden birine sorularak yapılabileceği gibi limit değerler, muhtemel patern dışına taşma kontrolleri ile de gerçekleştirilebilir.

15.2.PROGRAMLAMA HATALARI VE YAZILIM GÜVENİLİRLİĞİ

Bu bölümde bilgisayar programlama faaliyetlerinde olası insan hataları ve yazılım güvenilirliği konusu incelenmektedir. Yazılım güvenilirliğinden amaç, günümüzün modern yüksek donanım teknolojisine sahip bilgisayar sistemlerinde oldukça güvenilir yazılım sistemleri üretmektir.

15.2.1. Bilgisayar Programlama Faaliyetlerinde İnsan Hataları:

Gelişme aşamasında olan yazılım mühendisliği performansı yüksek yazılım üretme teknikleri ile ilgilenmekte, bilgisayar uzmanları insan mühendisleri ve psikologlar ile yaptıkları müşterek çalışmalar ile modeller kurmakta, hipotezler üretmekte ve sonuçları analiz etmektedirler.

•Programlama Teknikleri:

Bilgisayar programlamada insan faktörü konusunda yapılan bir çalışmada ⁷ hataların azaltılması ve programın daha etkin olarak üretilebilmesi için bir takım öneriler ileri sürmektedir:

(1) On-line programlama, off-line programlamaya nazaran programcı zamanından tasarruf sağlarken, fazla makina zamanı gerektirir.

(2) Bilgisayar yazılım karakteristiklerinden istifade ederek programcı programı mümkün olduğu kadar kısa zamanda ve programın çalışması esnasında kısa makina zamanı gerektirecek şekilde yazabilir.

(3). Detaylı akış çizitleri tipik programlama faaliyetinde kodlamaya yönelik çalışmalarda kolaylık sağlayabileğİ gibi program algoritması daha anlaşılabilir kılar.

(4) Program kodlanırken paragraf başlıklarının kullanımı, içerlek yazmalar okumada kolaylık sağlar.

(5) Yorumlar, derleyiciler tarafından icra edilmeyen deyimler olup uygun kullanımları programın anlaşılabilirliğine yardım eder.

(6) Yapısal programlama şeklinde ilerleme daha iyi program ile sonuçlanabilir. Genellikle ekip çalışmalarında kullanılan bir konsept olup birden fazla programcı aynı program üzerinde birlikte çalışırlar.

⁷ B. Kantowitz & R.Sorkin, "Human factors in programing", *Human Factors*, Der.Droumn. (New York: John Wiley & Sons, 1983)

•Programlama Lisanları:

Bilgisayar programlama lisanlarının genel özellikleri göz önüne alınarak daha etkin ve hatasız programla yapabilmek için dikkat edilmesi gereken noktalar:

(1) Yapısal programlama teknikleri deyimlerin sıralı olarak icra edilmesini gerektirir. Gerektiğinde program içinde FOR-NEXT döngülerini veya IF-THEN-ELSE deyiminin dikkatli kullanımı ile akış yönlendirilebilir. Yapısal programlama çoğu kez karmaşık kontrol yapısına ve hatalara neden olan GOTO deyiminin kullanımını en aza indirmiştir.

(2) Karmaşık bir programın mümkün olduğunca altıyordamlara bölünmesi daha iyi anlaşılmasını sağlar.

(3). 5 veya 8 karakterden meydana gelen anlamını hatırlatıcı isme sahip değişkenlerin kullanımı programın yapılmasına, anlaşılmasına ve daha sonraki aşamalarında iyileme ve güncelleştirilmesine katkı sağlar.

(4) Program derleyicisi bir hata yakaladığında hata mesajı üretir. Hatanın tip ve yerinin gösterilemesi kolayca bulunma ve giderilmesine yardımcı olur. Ancak, derleyicilerin tesbit ettiği hatalar genellikle mantıksal hatalar değildir. Programın adım adım icrasının izlenmesi, program geliştirme aşamasında daha faydalıdır.

15.2.2.Yazılımın Kalitesi

Yazılım geliştirmenin hedefi; yüksek kaliteli bir yazılım üretmektir. Kalite güvencesi, yazılım geliştirmenin her aşamasında uygulanan inceleme ve kalite kontrolü işlemleri, müşteriye teslim aşamasında kabul muayenesi ve nihayet müşteri tarafından kullanım sürecinde ise bakım yoluyla sağlanmaktadır.

Kaliteli yazılım; önceden belirlenmiş olan işlevsel gereksinimlerine, yazılım geliştirme standartlarına ve bir yazılımdan beklenen bütün özelliklere tamamen uygun bir yazılımdır.

•Yazılım kalitesini oluşturan faktörler;⁸

-Doğruluk: Spesifikasyonlara uygunluk ve müşteri isteklerini karşılama derecesi

-Güvenilirlik: Tasarlanan işlevleri, arzu edilen ortam ve sürede, arzu edilen duyarlılıkta yerine getirme olanağı

-Verimlilik: Programın işlevlerini yerine getirebilmesi için gerekli bilgi-işlem - kaynaklarının ve kodlama gideri

⁸ Oya Kalıpsız., *Bilgisayar Yazılım Mühendisliği*, İstanbul: İ.Ü.Basınevi ve Film Merkezi, 1992, s.231

- *Güvenlik*: Yetkisiz kişilerin yazılıma ya da yazılımın kullandığı verilere nüfuz edebilmesinin önleyebilme özelliği

-*Kullanışlılık*: Öğrenme, işletme, girdi hazırlama ve çıktı yorumlamada kolaylık derecesi

-*Hata bulabilme*: Hatanın yerini kısa zamanda bulabilme ve düzeltebilme kolaylığı

-*Esneklik*: Programda değişen koşullar paralelinde değişiklik yapabilme olanağı

-*Sinama kolaylığı*: Programın doğruluğunu sınamada kolaylık

-*Taşınabilirlik*: Programın farklı donanımlarda ve değişik yazılım sistemi ortamlarında kullanılma olanağı

-*Tekrar kullanılabilme*: Programın veya bir bölümünün başka bir programda kullanılabilme olanağı

-*Bağlanabilirlik*: Bir sistemin diğerine bağlanabilme olanağı

Bu faktörler (F_i) doğrudan ölçülemeyip, bazı özelliklere (C_j) bağlı doğrusal regresyon denklemi ile hesaplanabilir.⁹

$$F_i = \sum_{k=1}^n c_k m_k$$

Yazılım tasarımı tanımlandıktan sonra, tahmin veya kaynak programın hazırlanması tamamlandıktan sonra yazılım kalitesinin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş ölçüm yöntemleri:

1. Programın gücü:¹⁰

m : işleç adedi

k : farklı işlenen sayısı

M : işleç yinelenmelerinin toplamı

K : işlenen yinelenmelerinin toplamı

Program uzunluğu: $U = m \cdot \log_2 m + k \cdot \log_2 k$

Program hacmi: $H = (M + K) \log_2 (m + k)$

Hacim oranı: $O = 2 / m + k / K$

⁹ Oya Kalıpsız, *Ibid.*, s.232

¹⁰ Halstead M., *Elements of Software Science*, North Holland, 1977. Aktaran Kalıpsız O., *ob.cit.*

$$\text{Programın Gücü: } G = \frac{H}{O}$$

2.Karmaşıklık Derecesi:

Programın kontrol akışı biçimine dayalı olarak karmaşıklık derecesinin belirlenmektedir. Program grafi veya akış grafi adı verilen çizimde bulunan bölgelerin sayımı ile elde edilir. Graf içindeki kapalı bölgeler ile graf dışında kalan bölge sayılmakta ve bu sayı modülün karmaşıklığının, $V(G)$, vermektedir.

Bunların yanında modülün kalitesinin değerlendirilebilmesi amacıyla birtakım kriterler geliştirilmiştir.¹¹

1.Kalite güvenilirliği: Geçmiş bilgilere ve sınamaya dayalı olarak,

$$\text{Başarı oranı} = \text{Başarılı Süre} / \text{Toplam İşletim Süresi}$$

2.Kalite etkenliği: Gider kalemlerinin $C_3 > C_1 + C_2$ eşitsizliği ile belirlenmektedir.

C_3 = Kalite yetersizliği nedeniyle hata düzeltme gideri

C_1 = Kaliteyi yükseltme gideri

C_2 = Ortaya çıkabilecek hatayı yükseltme gideri

3.Hata bulma etkenliği = *Geliştirme aşamasında bulunan hata / Toplam hata*

4.Potansiyel hata miktarı = *bin kod satırı için ortalama hata * (1-hata bulma etkenliği)*

Program verimliliği, bir programcının bir ayda hazırlayabileceği kod sayısı, belge sayfası, bilgisayar işletim saati ve test program sayısı göz önüne alınarak değerlendirilir. Programlama gideri, programın büyüklüğüne göre;bit, kod satırı veya bin kod satırı için yapılan ortalama gider (yazılım projesinin geliştirilmesi, bakım-onarım için yapılan tüm harcamalar) göz önüne alınarak bulunur.

Yukarıda belirtilen, bir yazılımın kalitesini saptamak amacıyla geliştirilmiş tüm kriterlerde esas faktör insan kaynaklı yazılım hatalarıdır Bu hataların azaltılması yazılımın kalitesini arttırmasının yanısıra programlama giderlerini de azaltacaktır.

¹¹ Oya Kalıpsız, op.cit., s. 235

15.2.3.Yazılım Güvenilirliği

Bilgisayarla kontrol edilen modern, karmaşık sistemlerin performansı, anlaşılması zor yazılımların doğruluk ve bütünselliğine bağlı olup ideal yazılım güvenilirliği elde etmek kolay değildir. Yazılımdaki hatalar bilgisayar sistemlerinde daha kötü sonuçlar doğurabilecek arızalara neden olabilmektedir. Örneğin, NORAD hava ve füze savunma bilgisayar sistemindeki bir yazılım hatasından kaynaklanabilecek arıza, III. Dünya Savaşına sebep olabilecektir¹². Yazılım güvenilirliği, *bir programın; belirli ortamda, belirli süre için çalışabilme olasılığı* olarak tanımlanabilir.

Bilgisayar sistemleri, çalışma sırasında yazılım gözlenemeyen çeşitli giriş kombinasyonlarını işlerken, önceden kestirilemeyen yazılım hatalarından dolayı arızalanabilir. Karmaşık bir bilgisayar yazılımının geliştirilmesi sırasında yazılım belirli bir takım problemlerin test edildiği safhalardan geçirilmesine rağmen, bazı tür hatalar bu aşamalarda aşağıdaki nedenlerden¹³ dolayı tespit edilmemektedir.

1. Tek bir noktanın uygun olmayan kullanımı ve kontrolü, (örneğin sıfırla bölme gibi) o noktada hesaplanması istenen girdilere bağlı olarak yanlış bir çıktı üretebilmektedir.
2. İnci maddedeki bazı giriş bilgi setleri için kullanılacak bir algoritma ile bazı giriş bilgileri için kabul edilebilir toleranslı çıktı değerleri üretebilir.
3. İnci maddedeki uygulamanın bazılarında hata tesadüfen doğru çıktıyı üretebilir.
4. Bazı şartlı dallanmalar bazı girdiler icra edilemeyebilir.

Yazılımın maliyeti, kişinin yazılım geliştirmek için harcadığı işçilik ve yazılım geliştirmek için kullanılan makina zamanı ve programın içerdiği komut satırları ile orantılıdır. Karşılaştırıldığında, entegre edilmiş devre teknolojisindeki ilerlemeler donanım maliyetinde azalmalara sebep olmaktadır. Bu gibi net sonuçlar gelecekte yazılım maliyetinin bilgisayar donanım bedeliyle karşılaştırıldığında onun çok üzerinde olacağı tahmin edilmektedir.

¹² B.S.Dhillon, *Reliability Engineering in System design and Operation*, (New York: Van Nostrand Reinhold, 1983)

¹³ Schick ve R.Wolverton, *An analysis of complete software reliability models*, IEEE Trans.Software Engineering, 1978'den aktaran, *Kyung S.Park, Human Reliability*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam:1987, s.229

Hata bulma sürecinde, test etme ve çalıştırma sonunda, hataların bir çoğu hızlı bir şekilde yok edilebilir ve güvenilirlikteki büyüme ve gelişme zamanının bir fonksiyonu olarak edilebilir. görülecektir. Yazılımdaki fazlalıkların etkinliği azaltacağı tartışılmaz.

15.2.3.1.Yazılım Güvenilirlik Modelleri

Yazılımın güvenilirliğini değerlendirmek ve tahmin etmek için yapılan çalışmalar, yazılım güvenilirliği gelişme modelleri ve istatistiksel modeller olarak gruplanmaktadır. Yazılım güvenilirliği gelişme modeli, hata geçmişine dayalı olarak bir programın güvenilirliğini öngörmeye yarayan faaliyetleri kapsar. Bu modelde, yazılım hataları arasındaki zaman, yazılım güvenilirliği ve optimum yazılım yayın zamanı gibi yazılım sistemindeki yazılım hatalarının tahmini değerlerine ilişkin hesaplamalar yapılır. statiksel model, rastgele seçilen test koşullarına göre bir programın başarı/hata miktarlarını belirleyerek yazılım güvenilirliğinin yaklaşık olarak hesabı olup test aşamasında hatalar düzeltilmemektedir.

1.SHOOMAN MODELİ¹⁴: Bu modelde, T aylık çalışma sonunda bir yazılım sisteminde her makine lisansı komutu tahmini hata miktarına dayalı olarak $0,t$ aralığında hiçbir yazılım arızası olmama olasılığı (*yazılım güvenilirliği*) tahmin edilmek istenmektedir.

$$R(t) = e^{-CE(r,T)}$$

$E(r, T)$: T aylık hata bulma çalışması sonunda kalan hata miktarı

C : Sabit

Sistemde başlangıçta E_i adet hata olup sistemin sürekli faaliyeti boyunca bu hatalar düzeltilerek azalmaktadır. Model C ve $E(r, T)$ değerlerinin hesaplanması için birtakım denklemler önermekte olup, Hazard oranı fonksiyonunun sistemde kalan hatalar ile orantılı olduğu kabul edilmektedir.

¹⁴ Shooman, *Operational Testing and Software Reliability Estimation During Program Development*, IEEE Symposium on Computer Software Reliability, 1973, ss. 51-57'den aktaran, Daniel P.Siewiorek, Ronert S.Swart, ob.cit., s.280

2. JELINSKI-MORANDA MODELİ:

Model yazılım hatalarının üssel olarak dağıldığını varsaymaktadır.¹⁵

- Hataların ortaya çıkışları arasındaki oran sabittir.
- Tesbit edilen her hata düzeltilir böylece her seferinde toplam hata sayısı bir azalır.
- Arıza oranı kalan hata miktarı ile orantılıdır.

Modeli hata oranı: $h(t_i) = a[E - (i - 1)]$

t_i : Tespit edilen (i-1) ve i' nci hatalar arasındaki zaman

a : Oran katsayısı

E : Toplam ilk hata miktarı(bilinmiyor)

i-1 : Bulunulan tarihe kadar tespit edilen hata sayısı

Yazılım güvenilirliği: $R(t_i) = e^{[-a(E-i+1)t_i]}$

Arızaya Kadar Ortalama Zaman: $AKOZ = \frac{1}{a(E - i + 1)}$

3. YETERSİZ HATALI DÜZELTME MODELİ:

JM modelinde, hatalar bulunduğu zaman kesinlikle ortadan kaldırılacağı esasına dayanır. Bununla beraber gerçekte olay daima böyle değildir. Yetersiz hata modelinde, t zamanında sistemdeki hataların miktarı X(t), geçişim olasılıklarını mükemmel olmayan hata bulma ve düzeltme olasılığının oluşturduğu Markov süreci ile tayin edilmektedir. (i-1) aralığındaki arıza oranı ve i. arızalar aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$h(t_i) = b[E - p(i - 1)]$, b: her hatanın arıza oranıdır.

¹⁵ Z. Jelinski ve Moranda, *Software Reliability Research*, New York: Academic, 1972'den aktaran Kyung S.Park, op.cit.

4.NELSON MODELİ:

Nelson¹⁶, yazılım güvenilirliğini bir data alt kümesinden herhangi bir bilgisayar programını çalıştırmak için gerekli girdilerin, doğru ve kabul edilebilir çıkışı verebilecek bir veri alt kümesinden seçilmiş olması olasılığı ile tanımlamaktadır. Bu durumda yazılımın güvenilirliği, n adet örnek input ile programı çalıştırma sonucu yapılan ölçümler ile hesaplanır.

$R = 1 - \frac{n_e}{n}$ olup n_e , programın çalıştırılması aşamasında arızaların ortaya çıktığı veri miktarı.

Yazılım güvenilirliğini ölçmeye yönelik bu yaklaşım aynı kriterler için her biri farklı kişilerce yazılmış iki adet yapısal ve yapısal olmayan programa uygulanmıştır. Rastgele seçilen 1000 adet girdi için program koşturulmuş ve yapısal özelliğe sahip programın daha güvenilir olduğu görülmüştür.

5.HOMOJEN OLMAYAN POISSON SÜRECİ MODELİ:

Bu modelde¹⁷ yazılımın ilk hatası rastgele değişken gibi ele alınmaktadır. t zamanına kadar kümülatif hata miktarını gösteren sayma süreci, $\{N\{t\}, t \geq 0\}$, bağımsız artışlara sahip olup (k-1) ve k arızalar arası zaman (k-1)'in zamanına bağlıdır.

Eğer a tesbit edilecek yazılım hatalarının beklenen miktarını, $M(t)$, $M(0)=0$ ve $M(y)=a$ sınır şartlarına sahip t'ye kadar beklenen yazılım arıza oranını göstermekte olup aşağıdaki şekilde bulunur.

$$M(t) = a(1 - e^{-bt})$$

$$Pr ob\{N(t) = y\} = e^{-M(t)} \cdot M^y(t) / y!$$

a ve b parametreleri arıza verilerinden tahmin edilir.

¹⁶ E Nelson., " Estimating Software Reliability from test data", *Microelectronics and Reliability*, 17, (1978): 67

¹⁷ Kyung S.Park. op.cit., s. 302

15.2.3.2.GÜVENİLİR YAZILIM TEKNİKLERİ

Donanım hataları ile yazılım hataları arasındaki önemli bir farklılık, yazılım hatalarının dizayn hataları olmasıdır. Bu hatalar, genelde programcının programlama ve geliştirme faaliyetlerinde yapılmış olup hataların doğrulama testlerinde tespit edilip düzeltilememesi halinde kullanıcı tarafından tespit edilebilir. Hataların oluşması ratgele süreçler olarak gözlemlenmektedir. Fiziksel başarısızlıklardan farklı olarak dizayn hataları yinelenmeyebilir. Bilinen bir programlama hatasının düzeltilmesi esnasında bilmediğimiz birçok yeni hata meydana getirebilir. Donanıma nazaran daha aza popüler güvenilir yazılım teknikleri özet olarak aşağıda sıralandığı gibi özetlenebilir:¹⁸

1.Hatadan Kaçınma:

Yazılım sistemlerinin donanıma göre daha hızlı ve kompleks bir gelişme göstermesi, hatadan arındırılmış bir yazılım tekniği geliştirmeyi önemli kılmıştır. Bu hatadan kaçınma 1960'larda formüle edilmiş ve yazılım mühendisliği adını almıştır. Gittikçe gelişen yazılım mühendisliği konsepti 1980 lerde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Yazılım mühendisliğine destek veren bir sürü metodlar geliştirilmiş olup 1970'lerin yöntemleri, *küçük çapta programlama*-(programming-in-the-small), fikri üzerinde yoğunlaşmakta idi.

1980'lerde, yazılım mühendisliği, büyük-çapta-programla, (programming-in-the-large) kavramına doğru kaymıştır. Sistemler; yönetim şekilleri, yapıları ve etkileşimler nedeni ile karmaşık bir yapıya bürünmüşlerdir. Bu tip programları destekleyen veri tabanları geliştirilmiş ve varlıkları daha uzun süre devam edecektir. Döküman üretimi, versiyon kontrolü, konfigürasyon yönetimi, akıllı editörler ve programlama ortamlarına ilişkin yapılan çalışmaların çoğu yazılım geliştiricilerin üretkenliğini artırma üzerinedir.

Gerek programlama lisanlarında gerekse programlama ortamında ne kadar ilerleme yapılırsa yapılsın, sistemim; tasarımı, kodlaması ve testi o görevi gerçekleştirmek için atanan kişinin stiline, tecrübe ve yeteneğine bağlı kalmaktadır.

¹⁸ Murat Çınar ve Erkan Erişen, "Bilgisayar Sistemleri Güvenilirliği", Hv.H.O.Mezuniyet Projesi, (İstanbul:Hv.H.O.Yayınları, 1994)

2.Modülleme

İlk hatadan kaçınma tekniği; yagın adapte olabilme özelliğinin kazandırılması amacıyla modüllemenin kullanılmadır.Sitem dizaynı bir takım modüllere ayrılmaktadır. Modülün geliştiricisi "bilgi saklama" ve "korumaya yönelik proglamlama" tekniklerini kullanacak diğler modüller ile iletişim sadece kullanıcının bilmesi gerektiği kadar bilgiler ile olacaktır.

Eğer bir modül hatası düzeltilmiş yada yüksek performanslı bir diğeri ile yer değıştirilirse, modüllerin kalanı için yeniden tasarım gerekmecektir.

3. Nesneye Yönelik Proglamlama

Modül kullanımının mantıksal olarak geliştirilmiş şekli nesneye yönelik programlamadır. BİR nesne veri yapısını ve onu işleyen fonksiyon demektir. Harici fonksiyonlar içerde mevcut olan veri yapılarının nasıl işleneceğini gösterir. Modüllemede olduğu gibi veri yapıların ve erişim şeklinin değıştirilmesi diğler nesnelere etkilemez.

4.Yetkiye Dayalı Programlama:

Nesneye yönelik programlamada herhangi bir modül diğler bir modülle eşit erişebilirliğe sahiptir. Ancak çoğu zaman modüle erişimi sınırlama ihtiyacı doğar. Bu durumda yetkiye dayalı programlama, erişim yollarına engeller yerleştirir. Gerek modülleme, gerekse nesneye dayalı programlama ve yetkiye dayalı programlama mimari uygulamaları gerektirmektedir.

16.SONUÇ

Çoğu araştırma ve yayınlarda, sistemde insan katılımının derecesine bağlı olarak, arızaların büyük orandan insan hatasından kaynaklandığı, örneğin petrole çalışan güç santrallerinde¹ arızaların %20'sinden fazlasının yanlış prosedür uygulanması, bakım hatası, talimatların yanlış okunması gibi insan hareketinin doğrudan sonucu olan arızalar olduğu ileri sürülmektedir.

Teorik ve gerçek sistem güvenilirliklerin arasındaki farkın açıklanabilmesi yolundaki arzu; insan hatasının tahmini ve sistem güvenilirliği ve sistem etkenliğine sayısal bir faktör olarak ilave edilmesi yolundaki çalışmaları hızlandırmıştır. İnsan hatasının derecesi ve büyük sistemler üzerindeki etkisi üzerine dokuz Amerikan Hava Kuvvetleri füze sistemi üzerinde yapılan araştırmalar² insan hatalarının sistem arızaları üzerindeki katkı oranının %20-%53 olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu ve benzeri araştırmalar insan makina sistemleri etkenliğinin insan-operatör tarafından düşürüldüğünü göstermiştir.

Yapılan bu çalışmada sistem etkinliği içinde insan faktörü ögesinin incelenmesiyle, sistemdeki insan rolünün aynı sistemdeki donanımın rolü ile matematiksel olarak aynı olduğu görülmüştür.

Geleneksel güvenilirlik araştırma faaliyetlerinde en önemli noktalardan biri sistem güvenilirlik belirleme çalışması olup geleneksel modelde insan sisteme dahil bir eleman olarak göz önüne alınmamaktadır. İnsan ve donanım güvenilirliklerini kapsayacak şekilde sistem güvenilirlik modellerinin kurulabileceği ve sistem güvenilirlik analizlerinin yapılabileceği gözlenmiştir. Bu nedenle sistem içinde insan operatörü tarafından karşılaşılan problemlerin detaylı şekilde araştırılması ve sistem etkinlik ölçüleri üzerindeki etkileri sayısal olarak belirlenmelidir.

¹ J.Finnegan, C.A.Rau, T.Rettig, J.Weiss, "Personnel errors and power plant reliability", Proc. Ann. Reliability and Maintainability symp., 1980"

² A.Shapero, T.I.Cooper, M.Rappaport, K.H.Schaeff, C.Bates, "Human Engineering Testing and Malfunction Data Collection in Weapon System Test Programs", Technical Report, 1960

Faaliyete hazır oluşluk durumlarında askeri veya ticari cihazların idame problemleri büyük boyutlara ulaşmıştır. Birçok faktörün giderilmesine rağmen bakım problemlerinde hakim neden olan insana ilişkin faktörlerin alet karmaşıklığında gelişen ve artan bir şekilde yer alacaktır. Gerçek arıza tesbit ve bakım faaliyetlerinde bakım personeli tarafından karşılaşılan bakım problemlerinin doğasını araştırmak ve modern askeri, endüstriyel, ticari sistemlerde bakım performansının güvenilirliğini sayısal olarak belirlemek üzere çalışmalara yapılmalı ve atıl zamanı en aza indirecek ve sistem kullanımı ile hazır bulunuşluğunu optimize edecek modeller geliştirilmelidir.

İnsan güvenilirliğinin tesbiti çalışmalarını engelleyen en önemle etken muhtemelen bu husustaki veri eksikliğidir. İnsan güvenilirliği teknolojisinde bugüne kadar yapılan çalışmalarda araştırmacılar genellikle gayretlerini model üretmede yoğunlaştırmışlar, kullanılabilir insan performansı verilerinin üretimine ilişkin yeterli çalışma yapılmamıştır. İnsan hatası veri bankalarının kurulmasına ilişkin bazı çalışmalar varsa da bunların hiçbiri gerçek dünyadaki problemlerin halli için yani pratikteki kullanıma yeterli insan davranışı verileri sağlayamamaktadır.

Özellikle askeri araştırma ve geliştirmelerde insan-makine sistem etkinliğinde insan operatörünün önemi gittikçe artmaktadır. Sistem etkinliğinin üç ana kriteri olarak; güvenilirlik, var oluşluk ve idame edilebilirlik (reliability, availability, maintainability) kavramlarında insan faktörünün temel öge olarak ele alındığı, insan-makine sistem etkinliğinin entegre edilmiş ölçütlerini elde etmek amacıyla insan ve donanım performans ölçütlerini kombine eden çeşitli sistem etkinliği modelleri geliştirilmelidir.

Sonuç olarak, insan faktörü uzmanlarının insan-makine sistemlerinde insan faktörlerinin sayısal analizlerine ilişkin çalışmalarının yanında, alet ve sistem güvenilirliğine benzer şekilde insan performansı güvenilirliğinin sayısal olarak belirlenmesi yönündeki çalışmalara olan ihtiyacı gün geçtikçe artmakta ve artmaya devam edecektir.

KAYNAKÇA

A.B.Pontecorvo, "A method of predicting human reliability", *Annals of Reliability and Maintainability*, 1965, ss. 337-342

A.Goldman, W.K.Koch, "Human reliability in nuclear plant operation and maintenance", *Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp.*, 1981, ss. 180-184

A.Hald, *Statistical Theory with Engineering Applications*, New York:1952

A.I.Siegel, "A metod for predicting the probability of effective equipment maintenance", *Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp.*, 1972, ss. 400-406

A.I.Siegel, J.J.Wolf, M.R.Lautman, "A family model for measuring human reliability", *Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp.*, 1975, ss. 110-115

A.S.Goldman, T.B.Slattey, "Maintainability", (New York: Jhon Waley & Sons Inc.,1964)

Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment, *Reliability of Military Electronic Equipment*, U.S.Government Printing Office, Washington D.C. (1957)

Alain D. Swain, *Maintenance Diagrams for Preventive Maintenance of Ground Electronics Equipment*, American Institute for Research, Pittsburgh

Alain D.Swain, *A Method for Performing a Human Factors Reliability Analysis*, Monograph SCR-686, Sandia National Laboratories, Albuquerque

Alain D.Swain, H.E.Guttman, "Human reliability analysis applied to nuclear power", *Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp.*, 1975, ss. 116-119

Alain D.Swain., "Development of a human error rate data bank", *Proceedings of Human Reliability Workshop*, February,1971

Apostolakis G. & Pansal P., "Effect of human error on the availability of periodically inspected redundant systems", *IEEE Trans. Realibility*, ss.220-225, (1977)

B. Kantowitz & R.Sorkin, "Human factors in programing", *Human Factors*, Der.Droumn, (New York: John iley & Sons, 1983)

B.S.Blanchard, W.J.Fabrycky, *System Engineering and Analysis*, Prentice-Hall, New Jersey, 1981

Balbir .S.Dhillon ve Chanan Singh, *Engineering Reliability, New Techniques and Applications*, (New York: Jhon Waley & Sons, 1981)

Balbir S.Dhillon, "Human Error Data Banks", *Microelectronics and reliability*, vol 30, 1990, pp 963-971

Balbir S.Dhillon, "Modelling Human Errors in Repairable Systems", *Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp.*, 1989, pp. 418-424

Balbir S.Dhillon, *"Reliability and Maintainability Management"*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1985

Balbir S.Dhillon, *"Stochastic models for predicting human reliability"*, Microelectronics and reliability, vol 22, 1982, pp 491-496

Balbir S.Dhillon, *H.Reliability With Human Factors*, (New York: Pergamon Press, 1986)

Balbir S.Dhillon, *Reliability Engineering in System design and Operation*, (New York: Van Nostrand Reinhold, 1983)

Balbir S.Dhillon, *System Reliability, Maintainability and Management*, (New York: Petrocelli Books, Inc.,1983)

C.H.Duffee, *"Training and personnel impact on increased productivity"*, Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1982, pp. 497-503

C.O.Smith, *"Introduction to reliability"*, McGraw Hill, pp 162-166, New York, 1976

Carlz Sontz, J.C.Lamp, *"Prediction System Reliability From Human Data"*, Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1975, pp. 105-109

Cakir D.Hart ve T.Stewart, *Visual Display Terminals*, New York:Jhon Wiley & Sons, 1980

Carlz Sontz ve Louis M.N., *"Environmental Influence on Field MTTR"*, Annual Reliability and Maintainability Symposium, ss.172-177, Orlanda, 1983

Collins R., *The effects of inspector error on single sampling inspector plans*, Int. S. Production Research, 1973, c.11

Cox W. ve Cunningham C.E., *Applied Maintainability Engineering*, s.400, , New York: John Waley & Sons, 1972

D.R.Towill, *"Recent developments in the prediction of human operator performance"*, Generic Techniques in system reliability assesment, Edited by E.J.Henley and J.W.LYNN, 1976, pp. 411-415

D.S.Alain, *"Shurcuts in Human Reliability"*, *Generic Techniques in System Reliability Assesment?*, Der., E.J.Henley, J.N.Lynn, s.394, Noordhoff:1976

D.Sauer., W.B. Chambbell, *Relationships Between Human Recource Factors*, Report No. AFHL-TR-76 -85/AFWL-TR-76-301, Air Force Human Resources Lab., Ohio-1976

D.W.Repperger, D.B.Rogers, J.W.Frazier,R.V.Patten, *"A study on human tracking performance in an complex G field experiment"*, IEE transactions on systems, man and cybernetics, vol. SMC-12, no. 3, 1982, pp. 393-400

Daniel P. ve Robert S., *Reliable Computer Systems*, (Burlington:Digital Press, 1992)

David Meister, "*Human Factors in Reliability*", *Reliability Handbook*, der.W.G.Ireson, (New York:McGraw Hill, 1966)

David Meister, "*Subjective Data in Human Reliability Estimates*", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, California, Jan 17-19, 1972

David Meister., "*Methods of predicting human reliability in man-machine systems*", *Human Factors*, C.6, ss.621-646, 1962

David.Meister, "*The Problem of human initiated failures*", Eight National Symposium on Reliability and Quality Control, (1962)

Dimitri Keçecioglu, *Reliability Engineering, Lecture Notes*, National Defense Operational Research and Analysis Establishment Lib., (Ottawa: 1990)

Downs W.R., "*Maintainability analysis versus maintenance analysis*", Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Sysposium, IEEE, ss.476-481, New York (1976)

E Nelson., "*Estimating Software Reliability from test data*", *Microelectronics and Reliability*, 17, (1978): 67

E.J.McCormick, "*Human Factors in Engineering and Design*", McGraw-Hill, New York, 1970

E.S.Brown, "*System safety and human factors*", Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1974, pp. 197-200

E.W. Hagen, "*Control and Instrumentation*", *Nuclear Safety*, C.17, No.3, May-June 1976

F.H.Hawkins, "*Human factors in flight*", Jhon Wiley & Sons, Newyork, 1987, Chapter 1,2

G Anders., "*Human failure in determining an optimal inspection interval for equipment used in emergency conditions*", *IEEE Transactions on Systems, Mans & Cybernetics*, Sayfa: 290,295 (1985)

G.L.Berry, "*The weibull distribution as a human performance descriptor*", *IEE transactions on systems, man and cybernetics*, vol. SMC-11, no. 7, 1981, pp. 501-504

H.Ozkaptan, E.Levin, L.Jenney, "*Application of human factors to design for maintainability*", *Annals of Reliability and Maintainability*", 1965, pp. 349-356

Hain J.Gerald. ve Samuel Shapiro, *Statisticals Models in Engineering*, (New York: 1967)

Halstead M., *Elements of Software Science*, North Holland, 1977.

Howard, *Dynamic Probabilistic Systems*, (New York: Waley,1971)

Huges & Roy, "*Design of Equipment to Optimize Reliability for Manufacturer's and Costumer's Minimum Total cost*", Symposium on Advanced Marine engineering Concept for Increased Reliability , ss. 164-224, (Michigan:1963), ss.164-224

- Igor Bazovsky, *Reliability Theory and Practice*, Englewood, (Cliffs:Prentice Hall Inc., 1961)
- J Gould., "*Man-Computer Interfaces for information systems*", Human Engineering Lecture Notes, Michigan Üniversitesi, 1979
- J.D.Folley & S.J.Munger, *Design of Information Job Performance Aids*, Aerospace Medical Research Laboratories Report, Ohio (1961)
- J.H.Kao, "*A new Life Quality Measure for Electron Tubes*", IRE Trans. on *Reliability and Quality Control*, C.7
- J.M Christensen. ve Howard., *Field experience in maintenance*, (New York: Plenum Press, ,1981
- Jens Rasmussen, "*The role of the man-machine interface in systems reliability*", Generic Techniques in system reliability assesment, Edited by E.J.Henley and J.W.LYNN, 1976, pp. 315-323
- James R.King, *Team Easy Analysis Methods*, TEAM, C. 3, 1976
- Jens Rasmussen, Keith Duncan, Jaques Leplat, "*New Technology and Human Error*", (Suffolk:John Waley & Sons, 1988)
- Joint Army-Navy-Air Force Steering Committee, *Designing for maintainability, Human Engineering Guide to Equipment Design*, John Waley & Sons, New York (1972)
- K.Kim, "*Human Reliability model with probabilistic learning in continuous time domain*", Microelectronics and reliability, vol 29, 1989, pp 801-811
- K.P.Lasala, A.I.Siegel, C.Sontz, "*Allocation Man_Machine reliability*", Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1976, pp. 4-10
- K.P.Lasala, A.I.Siegel, "*Improved R&M and productivity by design for people*", Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1983, pp. 494-500
- Kyung S.Park, "*Human Reliability with probabilistic learning in discrete and continous task*", *Microelectronics and Reliability*, C.25, ss.157-166, 1985
- Kyung S.Park, *Human Reliability Analysis, Prediction and Prevention of Human Errors*, (Netherlands:Elsevier:Science Publishers B.V., 1987)
- Michael Sharpe, *General Theory of Markov Processes*, (Boston:Academic Press Inc.,1991)
- Misra R.B., "*Reliability evaluation of systems with critical human error*", Microelectronic and Reliability, C.24, 743-759, 1984
- Murat Çınar ve Erkan Erişen, "*Bilgisayar Sistemleri Güvenilirliği*", Hv.H.O.Mezuniyet Projesi, (İstanbul:Hv.H.O.Yayınları, 1994)

N. Morris & W Rouse., "Review and avalution of empirical research in troubleshooting", Human Factors, Vol:27, Sayfa:503, (1985)

O.Mona, "Application of Mathematics and Statistics to Reliability", Reliability Hand Book, (New York: McGraw Hill, 1966)

Oya Kalıpsız., *Bilgisayar Yazılım Mühendisliği*, İstanbul: İ.Ü.Basımevi ve Film Merkezi, 1992, s.231

P.Chase Wilton., "Measurement and prediction of human performance as a quantitative factor in system effectiveness", Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1965, ss. 803

R.Conrat ve A.Hull, "The prefered layout for numerical data entry keysets", *Ergonomics*, C.11(2), ss.165-173'den aktaran K.S.Park, op.cit. s.131

R.E:Smith, E.A:Felsted,D.Keçecioglu, "Distributions of Cycles to Failure in Simple Fatigue and The Associated Reliabilities", Annals of Assurance science, 8.Reliability and Maintainability Conference, Denver, ss.357-374

R.L.Henneman, W.B.Rouse, "Human performance in monitoring and controlling hierarchical large-scale systems", IEE transactions on systems, man and cybernetics, vol. SMC-14, no. 2, 1984, pp. 184-191

R.L.Henneman, W.B.Rouse, "Measures of human problem solving performance in fault diagnosis tasks", IEE transactions on systems, man and cybernetics, vol. SMC-14, no. 1, 1984, pp. 99-111

R.L.Horn, F.M.Hall, "Maintenance Centered Reliability", Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1983, pp. 197-204

R.L.Huston, A.M.Strauss, "Human reliability in man-machine interactions", Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1974, pp. 329-334

R.L.Street, "Reducing maintenance error by human engineering techniques", Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1974, pp. 469-471

Ramiz Cepkenli, "Genel Güvenilirlik Kuramı", (Doktora Seminer Ödevi, İ.Ü.İşletme Fakültesi, 1981)

S.Gaek, "Improving Output Through Job Performance Evaluation", Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1978, pp. 395-400

Schick ve R.Wolverton, *An analysis of complete software reliability models*, IEEE Trans.Software Engineering

Shooman, *Operational Testing and Software Reliability Estimation During Program Development*, IEEE Sysposium on Computer Software Reliability, 1973

Thaddeus L. Regulinski ve William B. Askren, "*Mathematical Modeling of Human Performans Reliability*", IEEE Catalog Number 69c 8-r, Chicago, 1969

Thaddeus L. Regulinski, "*Stochastic modeling of Human Performance Effectiveness Functions*", Proceedings Of Annual Symposium on Reliability, ss. 407-416, IEE Catalog NO. 72CH0577-7R, California:1972

W.B. Rouse, "*Optimal allocation of system development resources to reduce and/or tolerate human error*", IEE transactions on systems, man and cybernetics, vol. SMC-15, no. 5, 1985, pp. 620-630

W.B. Rouse, S.H. Rouse, "*Analysis and classification of human error*", IEE transactions on systems, man and cybernetics, vol. SMC-13, no. 4, 1983, pp. 539-548

W.G. Ireson., *Reliability Handbook*, (New York: Mc.Graw-Hill, 1966), ss.11/2

W.K. Chung, "*Common-cause failures and critical human errors in repairable and non-repairable systems*", Microelectronics and reliability, vol 30, 1990, pp 243-247

W.P. Chase, "*Measurement and prediction of human performance as a quantitative factor in system effectiveness*", Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 1965, pp. 803-816

W.T. Singleton, J.G. Fox, D. Whitfield, "*Measurement of man at work*", Taylor and Francis Ltd., New York, 1971

William B. Rouse, "*Analysis and Classification of Human Error*", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol:13, s.540, July-August 1983

Z. Jelinski ve Moranda, *Software Reliability Research*, New York: Academic